



**Universidade de
Aveiro**

2015

Departamento de Engenharia Mecânica

**Mafalda
Xavier Varela**

**A casa modular vista na perspetiva do engenheiro
mecânico**



**Universidade de
Aveiro**

2015

Departamento de Engenharia Mecânica

**Mafalda
Xavier Varela**

A casa modular vista na perspetiva do engenheiro mecânico

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica do Doutor Carlos Alberto Moura Relvas, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro e sob a coorientação científica do Doutor Nelson Amadeu Dias Martins, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

O júri

Presidente

Prof. Doutora Mónica Sandra Abrantes de Oliveira Correia
Professora Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Arguente

Prof. Doutor José António de Oliveira Simões
Professor Coordenador com Agregação da Escola Superior de Artes e Design de Matosinhos

Orientador

Prof. Doutor Carlos Alberto Moura Relvas
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Gostaria de deixar aqui o meu agradecimento ao professor Carlos Relvas pela orientação ao longo deste trabalho.

Um grande agradecimento em especial ao professor Nelson Martins pelas excelentes ideias dadas, pela paciência durante este processo de aprendizagem e acima de tudo por toda a motivação.

Um grande agradecimento aos meus pais pelo apoio e por nunca terem deixado que perdesse o rumo.

Aos meus irmãos por toda a amizade e carinho.

Ao João Pedro por todo o apoio e compreensão durante o curso e a realização desta dissertação.

Aos grandes amigos que fiz em Aveiro, sem eles estes cinco anos não teriam sido o mesmo.

palavras-chave

casa modular, funcionalidade, conforto, desenvolvimento do produto, modularidade, sustentabilidade, casa passiva, eficiência energética.

resumo

A construção pré-fabricada em si remonta a 1624, quando uma casa desmontada foi enviada de Inglaterra para *Cape Ann*, em *Massachusetts*, de modo a abrigar uma frota de pesca utilizando técnicas inglesas de construção, familiar aos colonos que haviam acabado de chegar à América. Desde então existiu uma grande evolução desde as casas pré-fabricadas até às casas modulares. No entanto, apesar dos inúmeros desenvolvimentos registados, a grande maioria das casas modulares ainda baseiam o seu processo de fabrico e montagem num processo centrado no projeto, onde prevalece o desenvolvimento, construção e montagem baseados nos princípios da construção civil, onde cada casa é um caso. Sabe-se também que uma das limitações deste tipo de construção é o tamanho dos módulos e as limitações do peso com base no método de envio, onde as poupanças acumuladas desde o processo de fabrico são muitas vezes descompensadas pelos custos do transporte.

O principal objetivo deste trabalho foi o desenvolvimento de um módulo habitacional unifamiliar e sua otimização, aplicando ferramentas da engenharia mecânica, nomeadamente, na área do desenvolvimento do produto e da térmica de edifícios, tendo-se conciliado estas duas vertentes.

Após uma análise bibliográfica optou-se por estruturas em painel que fossem modulares e fáceis de transportar em camião, reboque ou contentor marítimo e que fossem também fáceis de montar no local de montagem.

Paralelamente foi feito um estudo para cinco climas diferentes, tendo-se efetuado simulação dinâmica de edifícios de modo a apurar as melhores soluções construtivas ao nível da envolvente opaca, envidraçados e mecanismos de sombreamento, tendo resultado em cinco produtos modulares e diferentes entre si.

Com recurso à simulação dinâmica de edifícios foi possível obter casas modulares que cumprem com os níveis de conforto térmico adequados durante todo o ano. Foi também possível concluir que ao nível da eficiência energética, a única solução que cumpriu com as metas para ser considerada uma Casa Passiva foi a solução para o clima Dfb. Para o clima BSk a solução aproxima-se das metas. Para climas quentes e húmidos como é o caso dos climas Aw e Am as soluções ficaram longe de atingir valores de consumo energético pretendidos.

keywords

modular house, functionality, comfort, product development, modularity, sustainability, Passive House, energy efficiency.

Abstract

The prefabricated construction itself dates back to 1624, when an disassembled house was sent from England to Cape Ann in Massachusetts in order to shelter a fishing fleet using English construction techniques, familiar to the settlers who had just arrived to America. Since then there has been a major evolution from the pre-fabricated houses to the modular houses. However, despite the numerous developments, the vast majority of modular houses still base their manufacturing process and assembly in a process-centered design where development, construction and assembly prevails, based on the principles of construction, in which every house is a particular case. It is also known that one of the limitations of this type of construction is the size of the modules and weight limitations based on shipping method, where accumulated savings from the manufacturing process are often uncompensated by shipping costs.

The main objective of this project was the development of a single-family housing module and its optimization by applying mechanical engineering tools, namely in the product development and thermal buildings fields, having been reconciled these two aspects.

After a literature review the chosen solution was panel structures that were modular and easy to transport in truck, trailer or shipping container and they were also easy to assemble at the assembly site.

Furthermore, a study was done for five different climates, in which dynamic simulation was done in order to determine the best design solutions in terms of opaque envelope, glazing and shading mechanisms, resulting in five modular products, different from each other.

By using the dynamic simulation of buildings it was possible to obtain modular houses that meet the appropriate levels of thermal comfort throughout the year. It was also concluded that at the level of energy efficiency, the only solution that met the goals to be considered a Passive House was the solution to the Dfb climate. For the BSk climate the solution approaches the goals. For hot and humid climates such as Aw and Am climates, the solutions were far from reaching the desired energy consumption.

Índice geral

Índice geral	I
Índice de figuras	V
Índice de tabelas	XIII
Lista de acrónimos	XIX
1. Introdução	1
1.1. Contextualização	1
1.2. Objetivos do trabalho	1
1.3. Revisão bibliográfica	2
1.3.1. Construção pré-fabricada	2
1.3.2. Construção pré-fabricada do tipo modular	4
1.3.2.1. Tipos de sistemas de construção modular	5
1.3.3. Construção pré-fabricada do tipo painel	7
1.3.3.1. Painéis metálicos tipo <i>sandwich</i>	7
1.3.3.2. Painéis Isolados Estruturais	8
1.3.4. Fabrico atual de casas modulares pré-fabricadas	10
1.3.5. Constrangimentos e barreiras no <i>design</i> e inovação na construção pré-fabricada modular	12
1.3.6. Casas pré-fabricadas do tipo modular e sustentabilidade	16
1.3.6.1. Construção bioclimática	20
1.4. Resumo e conclusões do capítulo	23
1.5. Contributo do trabalho	25
1.6. Estrutura da dissertação	25
2. Breve história da evolução das casas modulares	27
2.1. Sumário	27
2.2. Período do colonialismo britânico	27
2.3. Da Revolução Industrial à Primeira Guerra Mundial	28
2.4. A Segunda Guerra Mundial e o pós-guerra	30
2.5. A segunda metade do século XX	32
2.6. Construção modular na atualidade	38

2.7. Resumo e conclusões do capítulo	40
3. Critérios e constrangimentos de projeto	41
3.1. Sumário	41
3.2. Principais critérios e constrangimentos.....	41
3.2.1. O Clima.....	41
3.2.1.1. Critério de escolha do clima	42
3.2.1.2. Caracterização do clima	44
3.2.2. A tipologia do módulo habitacional	50
3.2.2.1. Dimensões habitacionais mínimas	50
3.2.3. Transporte e logística	53
3.2.3.1. Normalização	53
3.2.3.2. Dimensões e peso dos meios de transporte	54
3.2.3.3. Dimensões do contentor.....	56
3.3. Estudo do dimensionamento dos painéis	57
3.4. Resumo e conclusões do capítulo	59
4. Especificação do produto	61
4.1. Sumário	61
4.2. Desenvolvimento do Produto.....	61
4.2.1. Matriz da Qualidade (QFD).....	63
4.2.1.1. Metodologia do QFD	64
4.2.1.2. Requisitos de clientes e especificações de produto casa modular	66
4.2.1.3. Determinação e qualificação das especificações do produto	67
4.2.2. Método do Esquema do Desenvolvimento do Produto (EDP)	74
4.2.2.1. Esquema representativo do desenvolvimento do produto	75
4.3. Desenvolvimento do módulo habitacional.....	77
4.3.1. Metodologia	77
4.3.2. Tipologia do módulo habitacional	77
4.3.3. Análise de soluções construtivas.....	79
4.4. Resumo e conclusões do capítulo	80
5. Projeto de conforto térmico e de habitabilidade	83
5.1. Sumário	83
5.2. Critérios, requisitos e indicadores associados ao projeto térmico	84

5.2.1. Critérios	84
5.2.1. Requisitos.....	86
5.2.2. Indicadores.....	88
5.3. Perfis de utilização e cargas térmicas interiores.....	90
5.4. Comportamento térmico e de habitabilidade	94
5.5. Soluções de climatização avaliadas	100
5.5.1. Estimativa e caracterização de consumo energético.....	104
5.6. Estudo paramétrico.....	115
5.7. Proposta base.....	127
5.8. Estudo de otimização.....	137
5.9. Análise de resultados.....	148
5.10. Discussão da solução proposta	154
5.11. Resumo e conclusões do capítulo	158
6. Proposta final	161
6.1. Sumário	161
6.2. Especialidades.....	162
6.2.1. Fundações.....	162
6.2.2. Estabilidade	164
6.2.2.1. Painel parede exterior	165
6.2.2.2. Painel parede interior	165
6.2.2.3. Painel cobertura	166
6.2.2.4. Painel pavimento.....	167
6.2.2.5. Caixilharia e sombreamento.....	168
6.2.2.6. Envidraçados.....	169
6.2.2.7. Portas.....	169
6.2.3. Térmica e climatização.....	170
6.2.4. Acústico	171
6.2.5. Saneamento e abastecimento de água	171
6.2.6. Instalação elétrica.....	172
6.3. Custos.....	172
6.4. Discussão da solução proposta	173
6.5. Resumo e conclusões do capítulo	177

7. Conclusões e trabalhos futuros	179
7.1. Conclusões	179
7.2. Trabalhos futuros	184
Referências	187
Anexos	199
Anexo I – Tabelas auxiliares na definição de critérios e de constrangimentos	199
Anexo II – Cálculos auxiliares do projeto térmico.....	205
Anexo III – Tabelas dos resultados do estudo térmico.....	208
Anexo IV – Tabelas de discriminação dos custos	210
Anexo V – Tabelas tipologias finais possíveis.....	215

Índice de figuras

Figura 1 – <i>Habitat' 67</i> de <i>Moshe Safdie</i> . É uma montagem de módulos de betão pré-fabricados (9).	3
Figura 2 – <i>Furniture House</i> de <i>Shigeru Ban</i> , onde foram utilizadas estruturas em painel para o esqueleto da estrutura interna da construção (10).	3
Figura 3 – Pavilhão IBM de <i>Renzo Piano</i> , pensado como uma série de componentes pré-fabricados para poderem ser desmontados, transportados e remontados (11).	3
Figura 4 – <i>Eames House</i> de <i>Charles e Ray Eames</i> , foi famosamente projetado para ser construído a partir de materiais padronizados, tanto quanto possível (12).	3
Figura 5 - Exemplo de sistema modular fechado: <i>LOFT CUBE</i> (2011) (18).	5
Figura 6 – Exemplo de sistema modular parcialmente aberto (17).	6
Figura 7 - Exemplo de sistema modular aberto (19).	6
Figura 8 - Sistema construtivo de elementos modulares (20).	7
Figura 9 – Painel metálico tipo <i>sandwich</i> (23).	8
Figura 10 – Painel SIP (à esquerda) (25). Esquema ilustrativo da construção recorrendo a <i>SIPs</i> (à direita) (26).	9
Figura 11 - Processo geral de construção para a construção modular (29).	11
Figura 12 - <i>Livinghome Rk1</i> (2006) (36).	16
Figura 13 - <i>Stillwater dwellings</i> (2008) (37).	17
Figura 14 – <i>Q-House</i> (2009) (39).	17
Figura 15 - <i>Paradigm House</i> (2012) (41).	18
Figura 16 - <i>Archi + Carbon Positive House</i> (2015) (42).	19
Figura 17 – Esquema resumindo os critérios necessários para a inovação da construção pré-fabricada modular (50).	24
Figura 18 - <i>Dom-ino House</i> (1914) (53).	28
Figura 19 – <i>Dymaxion House</i> (1930) (8).	29
Figura 20 – <i>Nissen Hut</i> (1945) (59).	30
Figura 21 – <i>Ferembal Demountable House</i> (1948) (60).	31
Figura 22 – Planta da <i>Acorn House</i> (1948) (8).	31

Figura 23 - <i>Maison Tropicale</i> (1951) (64).	32
Figura 24 - <i>Farnsworth House</i> (1951) (65).	33
Figura 25 – À esquerda: <i>Techbuilt House</i> (1953) (66). À direita: esquema de montagem da <i>Techbuilt House</i> (63).	33
Figura 26 - <i>Habitat '67</i> (1967) (67).	34
Figura 27 – <i>La Bulle Six Coques</i> (1967) (à esquerda e à direita) (69).	35
Figura 28 – <i>Futuro House</i> (1968) (70).	35
Figura 29 – <i>Venturo House</i> (1971) (71).	36
Figura 30 – <i>Yacht House</i> (1984) (76).	37
Figura 31 – <i>weeHouse</i> (2003) (77).	38
Figura 32 – <i>Micro Compact House</i> (2005) (78).	38
Figura 33 - <i>Quik House</i> (2009) (80).	39
Figura 34 - Mapa da classificação climática de <i>Köppen-Geiger</i> (1961) (83).	42
Figura 35 – Regiões com clima semiárido quente (BSh) (87).	44
Figura 36 – Regiões com o clima de savana tropical (Aw) (90).	45
Figura 37 – Regiões com clima semiárido frio (BSk) (87).	47
Figura 38 – Regiões com clima de monção tropical (Am) (95).	48
Figura 39 – Regiões com clima continental e suas variantes (98).	49
Figura 40 – Reboque de carga geral da Mergul (101).	55
Figura 41 - Reboque porta máquinas 2/3 eixos da Mergul (102).	55
Figura 42 - Semi-reboque de carga geral da Mergul (103).	55
Figura 43 - Semi-reboque porta máquinas (104).	55
Figura 44 – Exemplo de contentor (105).	56
Figura 45 – Esquema exemplo da vista de cima para um módulo de 8x8 m.	58
Figura 46 – Volume percentual dos elementos construtivos distribuídos no contentor de carga marítimo.	58
Figura 47 – Esquema da matriz da qualidade. Adaptado de (109).	65
Figura 48 – Matriz da Qualidade para a casa modular unifamiliar de tipologia T ₂ .68	
Figura 49 – Priorização da procura da qualidade.	70
Figura 50 – Priorização revista para os requisitos do cliente (peso absoluto).	70
Figura 51 – Priorização das especificações do produto.	71

Figura 52 – Matriz do Produto para os diversos elementos da casa modular unifamiliar.....	72
Figura 53 – Priorização do desenvolvimento do produto.	73
Figura 54 – Esquema do <i>design</i> do produto para o painel.....	76
Figura 55 - Aspeto exterior da casa modular referência de tipologia T ₂	78
Figura 56 – Possível planta da casa modular para a tipologia T ₂	78
Figura 57 – Cinco critérios para uma Casa Passiva. Adaptado de (117).	85
Figura 58 – Região de conforto para roupa de Verão (123).....	88
Figura 59 – Região de conforto para roupa de Inverno (123).....	89
Figura 60 - Médias anuais da temperatura do ar, da humidade relativa e das horas de desconforto no interior da casa sem climatização para o clima BSh.....	95
Figura 61 - Médias anuais da temperatura do ar, da humidade relativa e das horas de desconforto no interior da casa sem climatização para o clima Aw.	96
Figura 62 – Médias anuais da temperatura do ar, da humidade relativa e das horas de desconforto no interior da casa sem climatização para o clima BSk.....	97
Figura 63 - Médias anuais da temperatura do ar, da humidade relativa e das horas de desconforto no interior da casa sem climatização para o clima Am.	98
Figura 64 - Médias anuais da temperatura do ar, da humidade relativa e das horas de desconforto no interior da casa sem climatização para o clima Dfb.....	99
Figura 65 – Sistema <i>multi-split</i> (125).....	100
Figura 66 - Consumo energético anual desagregado na casa com climatização no clima BSh.	105
Figura 67 - Médias anuais da temperatura do ar, da humidade relativa e das horas de desconforto no interior da casa com climatização para o clima BSh.....	106
Figura 68 – Consumo energético anual desagregado na casa com climatização no clima Aw.....	107
Figura 69 - Médias anuais da temperatura do ar, da humidade relativa e das horas de desconforto no interior da casa com climatização para o clima Aw.	108
Figura 70 - Consumo energético anual desagregado na casa com climatização no clima BSk.	109
Figura 71 - Médias anuais da temperatura do ar, da humidade relativa e das horas de desconforto no interior da casa com climatização para o clima BSk.....	110

Figura 72 - Consumo energético anual desagregado na casa com climatização no clima Am.....	111
Figura 73 - Médias anuais da temperatura do ar, da humidade relativa e das horas de desconforto no interior da casa com climatização para o clima Am.	112
Figura 74 - Consumo energético anual desagregado na casa com climatização no clima Dfb.	113
Figura 75 - Médias anuais da temperatura do ar, da humidade relativa e das horas de desconforto no interior da casa com climatização para o clima Dfb.	114
Figura 76 – Efeito do coeficiente de transferência de calor (U) na necessidade de aquecimento (à esquerda) e de arrefecimento (à direita) para o clima BSh.	116
Figura 77 - Efeito da percentagem de envidraçado da envolvente da casa modular na necessidade de aquecimento (à esquerda) e de arrefecimento (à direita) para o clima BSh.	117
Figura 78 - Efeito da inércia das paredes internas da casa modular na necessidade de aquecimento (à esquerda) e de arrefecimento (à direita) para o clima BSh.	117
Figura 79 - Efeito da refletividade da camada exterior da cobertura da casa modular na necessidade de aquecimento (à esquerda) e de arrefecimento (à direita) para o clima BSh.	118
Figura 80 - Efeito do coeficiente de transferência de calor (U) na necessidade de aquecimento (à esquerda) e de arrefecimento (à direita) para o clima Aw.	118
Figura 81 - Efeito da percentagem de envidraçado da envolvente da casa modular na necessidade de aquecimento (à esquerda) e de arrefecimento (à direita) para o clima Aw.	119
Figura 82 - Efeito da inércia das paredes internas da casa modular na necessidade de aquecimento (à esquerda) e de arrefecimento (à direita) para o clima Aw. ...	119
Figura 83 - Efeito da refletividade da camada exterior da cobertura da casa modular na necessidade de aquecimento (à esquerda) e de arrefecimento (à direita) para o clima Aw.	120
Figura 84 - Efeito do coeficiente de transferência de calor (U) na necessidade de aquecimento (à esquerda) e de arrefecimento (à direita) para o clima BSk.	120

Figura 85 - Efeito da percentagem de envidraçado da envolvente da casa modular na necessidade de aquecimento (à esquerda) e de arrefecimento (à direita) para o clima BSk.	121
Figura 86 - Efeito da inércia das paredes internas da casa modular na necessidade de aquecimento (à esquerda) e de arrefecimento (à direita) para o clima BSk..	121
Figura 87 - Efeito da refletividade da camada exterior da cobertura da casa modular na necessidade de aquecimento (à esquerda) e de arrefecimento (à direita) para o clima BSk.	122
Figura 88 - Efeito do coeficiente de transferência de calor (U) na necessidade de arrefecimento para o clima Am.....	123
Figura 89 - Efeito da percentagem de envidraçado da envolvente da casa modular na necessidade de arrefecimento para o clima Am.....	123
Figura 90 - Efeito da inércia das paredes internas da casa modular na necessidade de arrefecimento para o clima Am.....	124
Figura 91 - Efeito da refletividade da camada exterior da cobertura da casa modular na necessidade de arrefecimento para o clima Am.....	124
Figura 92 - Efeito do coeficiente de transferência de calor (U) na necessidade de aquecimento (à esquerda) e de arrefecimento (à direita) para o clima Dfb.....	125
Figura 93 - Efeito da percentagem de envidraçado da envolvente da casa modular na necessidade de aquecimento (à esquerda) e de arrefecimento (à direita) para o clima Dfb.	125
Figura 94 - Efeito da inércia das paredes internas da casa modular na necessidade de aquecimento (à esquerda) e de arrefecimento (à direita) para o clima Dfb...	126
Figura 95 - Efeito da refletividade da camada exterior da cobertura da casa modular na necessidade de aquecimento (à esquerda) e de arrefecimento (à direita) para o clima Dfb.	126
Figura 96 - Consumo energético total após aplicação das medidas resultantes da análise paramétrica para o clima BSh.....	128
Figura 97 - Médias anuais de temperatura, humidade relativa e horas de conforto no interior da casa após aplicação das medidas resultantes da análise paramétrica para o clima BSh.	128

Figura 98 – Consumo energético total após aplicação das medidas resultantes da análise paramétrica para o clima Aw.....	130
Figura 99 – Médias anuais de temperatura, humidade relativa e horas de conforto no interior da casa após aplicação das medidas resultantes da análise paramétrica para o clima Aw.....	130
Figura 100 - Consumo energético total após aplicação das medidas resultantes da análise paramétrica para o clima BSk.	132
Figura 101 - Médias anuais de temperatura, humidade relativa e horas de conforto no interior da casa após aplicação das medidas resultantes da análise paramétrica para o clima BSk.	132
Figura 102 - Consumo energético total após aplicação das medidas resultantes da análise paramétrica para o clima Am.	134
Figura 103 - Médias anuais de temperatura, humidade relativa e horas de conforto no interior da casa após aplicação das medidas resultantes da análise paramétrica para o clima Am.	134
Figura 104 - Consumo energético total após aplicação das medidas resultantes da análise paramétrica para o clima Dfb.	136
Figura 105 - Médias anuais de temperatura, humidade relativa e horas de conforto no interior da casa após aplicação das medidas resultantes da análise paramétrica para o clima Dfb.	136
Figura 106 – Consumo energético anual desagregado após otimização, para o clima BSh.	138
Figura 107 – Médias anuais da temperatura do ar, da humidade relativa e das horas de desconforto no interior da casa após otimização, para o clima BSh.	139
Figura 108 – Consumo energético anual desagregado após otimização, para o clima Aw.....	141
Figura 109 – Médias anuais da temperatura do ar, da humidade relativa e das horas de desconforto no interior da casa após otimização, para o clima Aw.....	141
Figura 110 – Consumo energético anual desagregado após otimização, para o clima BSk.	143
Figura 111 – Médias anuais da temperatura do ar, da humidade relativa e das horas de desconforto no interior da casa após otimização, para o clima BSk.	143

Figura 112 – Consumo energético anual desagregado após otimização, para o clima Am.....	145
Figura 113 – Médias anuais da temperatura do ar, da humidade relativa e das horas de desconforto no interior da casa após otimização, para o clima Am.....	145
Figura 114 – Consumo energético anual desagregado após otimização, para o clima Dfb.	147
Figura 115 – Médias anuais da temperatura do ar, da humidade relativa e das horas de desconforto no interior da casa após otimização, para o clima Dfb.	147
Figura 116 – Evolução do consumo anual de energia nas três fases do estudo para o clima BSh.	149
Figura 117 - Evolução do consumo anual de energia nas três fases do estudo para o clima Aw.	150
Figura 118 - Evolução do consumo anual de energia nas três fases do estudo para o clima BSk.	151
Figura 119 - Evolução do consumo anual de energia nas três fases do estudo para o clima Am.....	152
Figura 120 - Evolução do consumo anual de energia nas três fases do estudo para o clima Dfb.	153
Figura 121 – Exemplo de uma laje de betão compactado (130).	162
Figura 122 – Exemplo de uma fundação de madeira (132).	163
Figura 123 – Exemplo de montagem da rede de abastecimento em PEBD nos painéis (137).....	172
Figura 124 – Proposta final para o clima BSh.	174
Figura 125 - Proposta final para o clima Aw.....	174
Figura 126 - Proposta final para o clima BSk.	175
Figura 127 - Proposta final para o clima Am.	176
Figura 128 - Proposta final para o clima Dfb.	176

Índice de tabelas

Tabela 1 – Classificação de sistemas pré-fabricados. Representação dos diferentes níveis de pré-fabricação utilizado na construção. Adaptado de (8).	3
Tabela 2 – Classificação do clima e sua população total, país representante e respetivo PIB <i>per capita</i> . Adaptado com base em (85).	43
Tabela 3 - Áreas mínimas dos compartimentos segundo o Artigo 66.º do RGEU.51	
Tabela 4 – Área bruta mínima dos fogos de acordo com o Artigo 67.º do RGEU.51	
Tabela 5 – Dimensões e peso dos possíveis veículos a utilizar no transporte dos painéis para o módulo habitacional.	55
Tabela 6 - Tabela adaptada de (105) com as características dimensionais de contentores de carga seca.	56
Tabela 7 - Dimensões máximas dos painéis.	57
Tabela 8 – Áreas e tipologias possíveis para os módulos de modo a cumprir com os requisitos e constrangimentos.	59
Tabela 9 – Quadro de resumo das tipologias habitacionais possíveis para cada tipo de contentor.	60
Tabela 10 - Caracterização dos elementos construtivos iniciais.	79
Tabela 11 - Requisitos para uma Casa Passiva. Adaptado de (119) e de (120)..	86
Tabela 12 – Requisitos de energia primária na Estónia, que entrou em vigor desde 9 Janeiro de 2013. Adaptado de (121).	87
Tabela 13 – Perfil de utilização utilizado no <i>DesignBuilder</i> para as quatro zonas do módulo habitacional para o clima BSh.	92
Tabela 14 - Perfil de utilização utilizado no <i>DesignBuilder</i> para as quatro zonas do módulo habitacional para o clima Aw.	92
Tabela 15 - Perfil de utilização utilizado no <i>DesignBuilder</i> para as quatro zonas do módulo habitacional para o clima BSk.	93
Tabela 16 - Perfil de utilização utilizado no <i>DesignBuilder</i> para as quatro zonas do módulo habitacional para o clima Am.	93
Tabela 17 - Perfil de utilização utilizado no <i>DesignBuilder</i> para as quatro zonas do módulo habitacional para o clima Dfb.	94

Tabela 18 - Médias mensais da temperatura ambiente (T. A.), da temperatura operativa (T. Op.) e da humidade relativa (HR) no interior da casa modular sem climatização para o clima BSh.	95
Tabela 19 - Médias mensais da temperatura ambiente (T. A.), da temperatura operativa (T. Op.) e da humidade relativa (HR) no interior da casa modular sem climatização para o clima Aw.	96
Tabela 20 - Médias mensais da temperatura ambiente (T. A.), da temperatura operativa (T. Op.) e da humidade relativa (HR) no interior da casa modular sem climatização para o clima BSk.....	97
Tabela 21 - Médias mensais da temperatura ambiente (T. A.), da temperatura operativa (T. Op.) e da humidade relativa (HR) no interior da casa modular sem climatização para o clima Am.....	98
Tabela 22 - Médias mensais da temperatura ambiente (T. A.), da temperatura operativa (T. Op.) e da humidade relativa (HR) no interior da casa modular sem climatização para o clima Dfb.....	99
Tabela 23 - Caracterização técnica da solução para a ventilação mecânica dimensionada.	102
Tabela 24 – Caracterização técnica da solução para o arrefecimento.....	103
Tabela 25 - Caracterização técnica da solução para o aquecimento dimensionada	104
Tabela 26 – Resultados das simulações para diferentes orientações da casa referência.	105
Tabela 27 - Médias mensais da temperatura ambiente (T. A.), da temperatura operativa (T. Op.) e da humidade relativa (HR) no interior da casa modular com climatização para o clima BSh.	107
Tabela 28 – Resultados das simulações para diferentes orientações da casa referência.	107
Tabela 29 - Médias mensais da temperatura ambiente (T. A.), da temperatura operativa (T. Op.) e da humidade relativa (HR) no interior da casa modular com climatização para o clima Aw.	109
Tabela 30 – Resultados das simulações para diferentes orientações da casa referência.	109

Tabela 31 - Médias mensais da temperatura ambiente (T. A.), da temperatura operativa (T. Op.) e da humidade relativa (HR) no interior da casa modular com climatização para o clima BSk.....	111
Tabela 32 – Resultados das simulações para diferentes orientações da casa referência.	111
Tabela 33 - Médias mensais da temperatura ambiente (T. A.), da temperatura operativa (T. Op.) e da humidade relativa (HR) no interior da casa modular com climatização para o clima Am.....	113
Tabela 34 – Resultados das simulações para diferentes orientações da casa referência.	113
Tabela 35 - Médias mensais da temperatura ambiente (T. A.), da temperatura operativa (T. Op.) e da humidade relativa (HR) no interior da casa modular com climatização para o clima Dfb.....	115
Tabela 36 – Parâmetros analisados no estudo paramétrico.	115
Tabela 37 - Médias mensais da temperatura ambiente (T. A.), da temperatura operativa (T. Op.) e da humidade relativa (HR) no interior da casa após aplicação das medidas resultantes da análise paramétrica para o clima BSh.	129
Tabela 38 – Médias mensais da temperatura ambiente (T. A.), da temperatura operativa (T. Op.) e da humidade relativa (HR) no interior da casa após aplicação das medidas resultantes da análise paramétrica para o clima Aw.	131
Tabela 39 - Médias mensais da temperatura ambiente (T. A.), da temperatura operativa (T. Op.) e da humidade relativa (HR) no interior da casa após aplicação das medidas resultantes da análise paramétrica para o clima BSk.	133
Tabela 40 - Médias mensais da temperatura ambiente (T. A.), da temperatura operativa (T. Op.) e da humidade relativa (HR) no interior da casa após aplicação das medidas resultantes da análise paramétrica para o clima Am.....	135
Tabela 41 - Médias mensais da temperatura ambiente (T. A.), da temperatura operativa (T. Op.) e da humidade relativa (HR) no interior da casa após aplicação das medidas resultantes da análise paramétrica para o clima Dfb.	137
Tabela 42 - Médias mensais da temperatura ambiente (T. A.), da temperatura operativa (T. Op.) e da humidade relativa (HR) no interior da casa após aplicação das medidas resultantes do estudo de otimização para o clima BSh.....	140

Tabela 43 - Médias mensais da temperatura ambiente (T. A.), da temperatura operativa (T. Op.) e da humidade relativa (HR) no interior da casa após aplicação das medidas resultantes do estudo de otimização para o clima Aw.	142
Tabela 44 - Médias mensais da temperatura ambiente (T. A.), da temperatura operativa (T. Op.) e da humidade relativa (HR) no interior da casa após aplicação das medidas resultantes do estudo de otimização para o clima BSk.	144
Tabela 45 - Médias mensais da temperatura ambiente (T. A.), da temperatura operativa (T. Op.) e da humidade relativa (HR) no interior da casa após aplicação das medidas resultantes do estudo de otimização para o clima Am.	146
Tabela 46 - Médias mensais da temperatura ambiente (T. A.), da temperatura operativa (T. Op.) e da humidade relativa (HR) no interior da casa após aplicação das medidas resultantes do estudo de otimização para o clima Dfb.	148
Tabela 47 – Constituição e espessura dos componentes do painel da parede exterior para cada clima.	154
Tabela 48 – Constituição e espessura dos componentes do painel da parede interior para cada clima.	155
Tabela 49 – Constituição e espessura dos componentes do painel cobertura para cada clima.	156
Tabela 50 - Constituição e espessura dos componentes do painel do pavimento para cada clima.	156
Tabela 51 – Opções de sombreamento da janela para cada clima estudado.	157
Tabela 52 - Opções de sombreamento local para cada clima estudado.	157
Tabela 53 – Soluções de modelos de envidraçados aplicados para cada clima estudado.	157
Tabela 54 – Quadro de resumo dos resultados obtidos na análise paramétrica.	158
Tabela 55 – Resumo dos resultados finais após otimização para os diferentes climas.	159
Tabela 56 – Quadro de resumo das especificações dos sistemas de climatização para cada clima estudado.	170
Tabela 57 – Preço base e energia anual consumida para casas modelo de tipologia T ₂ de acordo com o tipo de clima.	173

Tabela 58 – Quadro de resumo com as conclusões finais relativo às áreas e tipologias possíveis para os módulos com painéis de paredes exteriores com $U=0,10 \text{ W/(m}^2\text{K)}$, de modo a cumprir com os requisitos e constrangimentos. ...	182
Tabela 59 – Resumo das conclusões finais relativo às áreas e tipologias possíveis para os módulos com painéis de paredes exteriores com $U=0,45 \text{ W/(m}^2\text{K)}$, de modo a cumprir com os requisitos e constrangimentos.	182
Tabela 60 - Resumo das conclusões finais relativo às tipologias habitacionais possíveis para os módulos com painéis de paredes exteriores com $U=0,10 \text{ W/(m}^2\text{K)}$, para cada tipo de contentor.	182
Tabela 61 - Resumo das conclusões finais relativo às tipologias habitacionais possíveis para os módulos com painéis de paredes exteriores com $U=0,45 \text{ W/(m}^2\text{K)}$, para cada tipo de contentor.	182

Lista de acrónimos

AQS	Água Quente Sanitária
ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers</i>
AVAC	Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado
BIM	<i>Building Information Modeling</i>
C	Constrangimento
CAD	<i>Computer-Aided Design</i>
CAM	<i>Computer Aided Manufacturing</i>
COP	Coeficiente de performance
CP	Características do Produto
DbI	<i>Double</i>
DFMA	<i>Design for Manufacturing and Assembly</i>
DOE	<i>USA Department of Energy</i>
EDP	Esquema do <i>Design</i> do Produto
HR	Humidade Relativa
LEED	<i>Leadership in Energy and Environmental Design</i>
LED	<i>Light-Emitting Diode</i>
LoE	<i>Low Energy</i>
MD	Métrica de desempenho
nZEB	<i>Net Zero Energy Building</i>
OSB	<i>Oriented Strand Board</i>
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PEBD	Polietileno de Baixa Densidade
PIB	Produto Interno Bruto
PVC	Policloreto de vinil
PVC-U	Policloreto de vinil não plastificado
QFD	<i>Quality Function Deployment</i>
RF	Requisito Funcional
RGEU	Regulamento Geral das Edificações Urbanas
RPH	Renovações Por Hora
SIP	<i>Structural Insulated Panel</i>
SCE	Sistema de Certificação Energética dos Edifícios
TEU	<i>Twenty feet Equivalent Unit</i>
Trp	<i>Triple</i>
3D	3 Dimensões

1. Introdução

1.1. Contextualização

A evolução das casas pré-fabricadas até às casas modulares demonstra que o trabalho desenvolvido, visa essencialmente responder a requisitos de tempo e custo, sem comprometer os aspetos estéticos, de habitabilidade, conforto e eficiência energética.

No entanto, apesar dos inúmeros desenvolvimentos registados, a grande maioria das casas modulares ainda baseiam o seu processo de fabrico e montagem num processo centrado no projeto, onde prevalece o desenvolvimento, a construção e montagem baseados nos princípios da construção civil, onde cada casa é um caso. Nesse sentido e considerando os requisitos prévios de uma casa e considerando uma casa como um produto industrial questiona-se se é possível intervir no processo de desenvolvimento, construção e montagem da mesma, de modo a aproximar estas duas abordagens, a da construção civil e a da construção mecânica.

Assim pretende-se analisar quais e de que forma as ferramentas projetuais e construtivas habitualmente utilizadas na construção mecânica podem ser introduzidas no projeto, na conceção e no fabrico de uma casa modular de modo a aproximar o seu processo do desenvolvimento ao de um produto industrial centrado no processo.

1.2. Objetivos do trabalho

Este trabalho tem como principal objetivo o desenvolvimento do projeto e do processo de fabrico de um módulo habitacional unifamiliar, aplicando os princípios da engenharia mecânica.

Pretende-se assim, através das ferramentas usualmente utilizadas no desenvolvimento do produto e na térmica de edifícios, otimizar o processo de desenvolvimento do projeto.

Nesse sentido, pretende-se utilizar simulação dinâmica de edifícios, sendo esta uma ferramenta especializada que permite “quantificar os potenciais consumos de energia num edifício, dando a conhecer as necessidades de aquecimento e arrefecimento, os ganhos internos derivados da utilização do edifício e dos seus elementos exteriores, perdas pela envolvente, desagregação de consumos” (1), entre outros, simulando diversas soluções para o projeto. Recorrendo-se a esta, pretende-se projetar um módulo cumprindo com os níveis de conforto térmico adequados e de eficiência energética, aplicando técnicas passivas, com principal foco no estudo da envolvente do módulo, desde os elementos construtivos, o nível de isolamento, a percentagem de envidraçado mais apropriada, entre outros aspetos considerados relevantes para o estudo.

1.3. Revisão bibliográfica

1.3.1. Construção pré-fabricada

Ao longo do século XX, principalmente, os principais arquitetos tentaram desenvolver protótipos de casas pré-fabricadas para produção em massa tendo obtido pouco sucesso. São exemplo disso, a *"La maison standardisée"* de *Le Corbussier*, a *Dymaxion House* de *Buckminster Fuller*, *Usonian Automatic Building System* de *Frank Lloyd Wright* e as *Copper Houses* de *Walter Gropius* (2).

No entanto, hoje em dia parece haver um interesse renovado na integração da pré-fabricação e da pré-montagem para melhorar a qualidade e para economizar o tempo da construção.

O conceito de “pré-fabricação”, segundo CIRIA (3) citado por *Jaillon* e *Poon* (4) consiste num processo de fabrico e de pré-montagem que ocorre geralmente numa instalação especializada e em que vários materiais são unidos para formar um componente da instalação final. O processo de fabrico em si pode ser realizado

num ambiente de fábrica ou sob céu aberto no próprio local (5). De referir que a fabricação fora do local é usada quando ambas, pré-fabricação e pré-montagem são integradas (6).

Ainda citando *Jaillon* e *Poon* (4), estes referem que *Gibb* (6), no seu trabalho, identificou três categorias de fabricação *offsite*, tais como, não-volumétrica, volumétrica e construção modular, sendo que a linha que divide cada tipo é flexível. *Richard* (7), no seu trabalho, refere que a pré-fabricação tem sido identificada como o primeiro grau da industrialização, seguido da mecanização, automação, robótica e reprodução.

Tabela 1 – Classificação de sistemas pré-fabricados. Representação dos diferentes níveis de pré-fabricação utilizado na construção. Adaptado de (8).

<div> <div>diminuição do tamanho dos componentes pré-fabricados</div> <div>aumento do grau de trabalho da construção <i>onsite</i></div> </div>			
Estruturas Modulares	Estruturas Pannel	Componentes Pré-fabricados	Materiais Processados
Componentes que estão na forma volumétrica e que formam uma parte de um edifício concluído (ou um edifício completo em si), e que tipicamente possuem superfícies interiores e exteriores acabadas.	Componentes que são compostos por uma série de elementos pré-fabricados (janelas, portas, painéis), mas que não encerram espaço útil em si. Tipicamente exigem mais trabalho no local de fabrico mas será mais barato para enviar para o local de montagem de forma compacta.	Refere-se a qualquer conjunto único fabricado na fábrica, geralmente porque não pode ser construído no local de montagem ou pode ser usado para ajudar a velocidade ou a qualidade de construção.	Elementos de construção fabricados fora do local de montagem e enviados para o local de construção constituem a maioria dos materiais usados na construção de hoje, permitindo vãos maiores e acabamentos personalizados.
 <p>Figura 1 – <i>Habitat</i> 67 de <i>Moshe Safdie</i>. É uma montagem de módulos de betão pré-fabricados (9).</p>	 <p>Figura 2 – <i>Furniture House</i> de <i>Shigeru Ban</i>, onde foram utilizadas estruturas em pannel para o esqueleto da estrutura interna da construção (10).</p>	 <p>Figura 3 – Pavilhão IBM de <i>Renzo Piano</i>, pensado como uma série de componentes pré-fabricados para serem desmontados, transportados e remontados (11).</p>	 <p>Figura 4 – <i>Eames House</i> de <i>Charles</i> e <i>Ray Eames</i>, foi famosamente projetado para ser construído a partir de materiais padronizados, tanto quanto possível (12).</p>

Técnicas de pré-fabricação têm sido progressivamente adotadas na indústria da construção em vários países.

Segundo *Greven e Baldauf* (13) citados por *Patinha* (14), o recurso aos métodos construtivos disponíveis atualmente tornam o sector da construção civil pouco racional do ponto de vista produtivo, existindo grandes disparidades nos índices de produtividade e nos desperdícios, resultando num aumento do preço final da construção.

Em 2011, a McGraw Hill Construction realizou um estudo entre arquitetos, engenheiros, empreiteiros e proprietários de edifícios, concluindo que a qualidade e a segurança podem ser aumentadas com a construção modular e que, por sua vez, os custos totais, o desperdício de material, assim como o impacto sobre o meio ambiente podem ser reduzidos (15).

1.3.2. Construção pré-fabricada do tipo modular

Em relação ao conceito de construção pré-fabricada modular este não é recente, sendo a evolução das casas pré-fabricadas até ao conceito de casas modulares (em módulos) ilustrado no livro *Prefab Houses* de *Arnt Cobbers e Oliver Jahn* (16). Neste, constata-se que já foram projetados diversos modelos de casas com formatos invulgares, usando materiais muitas vezes pouco comuns ou mais utilizados em determinada época.

Atualmente, as casas modulares são compostas por várias “caixas” diferentes, ou “módulos”, que são fabricados individualmente. Os componentes de uma casa modular são construídos num ambiente de fábrica onde o controlo de qualidade é monitorizado em cada estação na linha de produção. Em cada unidade modular é necessário que sejam ajustados os mesmos parâmetros como que para um contentor de tamanho normalizado para que esta possa ser transportada para o local onde é montada numa estrutura coesa.

A modularidade e a pré-fabricação estão a tornar-se uma escolha natural, como solução de custo e de economia de energia, apesar da tendência persistente para a adesão a materiais e técnicas tradicionais. A facilidade de construção e a sua

diversidade estilística permitem um produto final que consegue ser indistinguível daquele construído pelos métodos tradicionais. Para tal, é cada vez mais importante que as técnicas modulares sejam integradas desde início no processo de *design*.

1.3.2.1. Tipos de sistemas de construção modular

Segundo *Lawson* (2007) (17) citado por *Patinha* (2013) (14) a classificação das construções modulares, tendo por base a morfologia individual de cada sistema, assim como o sistema de montagem, pode ser dividida em: sistemas modulares fechados, sistemas parcialmente abertos, sistemas abertos, sistemas construtivos de elementos modulares e sistemas mistos ou híbridos.



Figura 5 - Exemplo de sistema modular fechado: *LOFT CUBE* (2011) (18).

Define-se como sistemas modulares fechados, tipo células, aqueles cujos módulos assemelham-se a contentores de transporte. Ou seja, o espaço interior é previamente preparado e a sua função não pode ser alterada. Este tipo de módulo é caracterizado pelo seu elevado grau de standardização e pré-fabricação, estando este praticamente prontos a habitar após a sua instalação. Estes módulos podem ser empilhados, ligados entre si ou suspensos por uma estrutura metálica principal que funciona como esqueleto.

A casa modular vista na perspectiva do engenheiro mecânico



Figura 6 – Exemplo de sistema modular parcialmente aberto (17).

Como sistemas parcialmente abertos tem-se que estes são estruturas semelhantes às anteriores, mas com aberturas laterais que permitem que estes sejam ligados a outros módulos, podendo ser também empilhados.



Figura 7 - Exemplo de sistema modular aberto (19).

Os sistemas abertos são definidos, como o nome indica, como módulos completamente ou parcialmente abertos dos 4 lados, constituídos por vigas que suportam os pisos e pilares nos cantos. Estes módulos podem ser agrupados segundo diferentes direções com o objetivo de criar espaços cobertos maiores.

Neste tipo de sistema, os módulos podem ser ligados em várias direções diferentes, permitindo um maior número de configurações.



Figura 8 - Sistema construtivo de elementos modulares (20).

Nos sistemas construtivos de elementos modulares, os elementos estruturais e os não estruturais são fabricados com dimensões padrão, de modo a serem ligados de forma rápida e eficaz. Por norma possuem um grau de pré-fabricação menor permitindo, no entanto, um grau de personalização maior. Regra geral permitem produzir painéis pré-fabricados para pisos e paredes.

Para terminar, são considerados sistemas mistos ou híbridos aqueles em que os diversos sistemas misturam-se de modo a formar a estrutura final da habitação.

1.3.3. Construção pré-fabricada do tipo painel

1.3.3.1. Painéis metálicos tipo *sandwich*

Painéis metálicos do tipo sandwich são elementos pré-fabricados que possuem um núcleo de isolamento térmico e sonoro interno entre duas camadas de chapas de aço pré-pintado e galvanizado (21). O núcleo de isolamento pode ser de lã mineral ou de poliuretano.

Este tipo de painéis permitem economizar até 20% em custos de energia nos edifícios, uma vez que possuem uma excelente estanquicidade, assim como redução das emissões de CO₂ (22). Esta é uma solução também mais económica podendo ser otimizadas as espessuras do isolamento.

Existe uma grande variedade deste tipo de estruturas sendo que o comprimento varia entre os 2 e os 18,5 metros, a largura entre 1 e 2 metros e a espessura entre os 50 milímetros e os 300 milímetros.

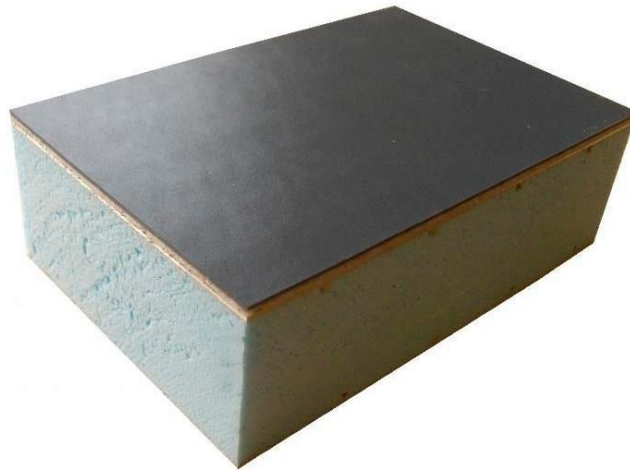


Figura 9 – Painel metálico tipo *sandwich* (23).

Os painéis metálicos do tipo sanduíche são utilizados em aplicações onde é necessária alta rigidez estrutural e baixo peso.

Na construção em específico são usados em fachadas, divisórias e coberturas. As aplicações mais comuns incluem indústria, escritórios e edifícios comerciais, ginásios e armazéns. Os painéis também são adequados para a construção de indústria de alimentos e aplicações que de elevada exigência ao nível da limpeza do espaço.

1.3.3.2. Painéis Isolados Estruturais

Os Painéis Isolados Estruturais (do inglês *Structural Insulated Panels* ou *SIPs*) são componentes projetados para eliminar pontes térmicas, preocupação prevalente na construção em madeira leve. Estes painéis são constituídos por duas placas de

OSB, do inglês *Oriented Strand Board*, aglomerado de partículas de madeira longas e orientadas com cerca de 10 milímetros cada e no meio destas constituída por uma camada de poliestireno expandido com uma espessura entre os 80 e os 140 milímetros e que é responsável pelo eficiente isolamento térmico e acústico (14). Os painéis tanto servem para a construção das paredes exteriores e interiores como para a construção de lajes e coberturas. Estes são aparafusados a perfis metálicos no topo e na base dos painéis que se encontram em todo o perímetro da estrutura, formando um esqueleto que lhe confere rigidez (24). Por vezes, em vez de perfis metálicos é possível ter toda a estrutura executada apenas em madeira, tendo os painéis a função estrutural. Os diferentes painéis podem ser combinados e a abertura para portas e janelas é efetuada durante o processo de montagem recorrendo a perfis em “L”. As dimensões dos painéis rondam os 1200 por 2400 milímetros. No lado exterior podem existir perfis de aço galvanizado a conferir maior rigidez ao painel, sendo fabricados com uma espessura de aproximadamente 1 milímetros e espaços de 400 a 600 milímetros.

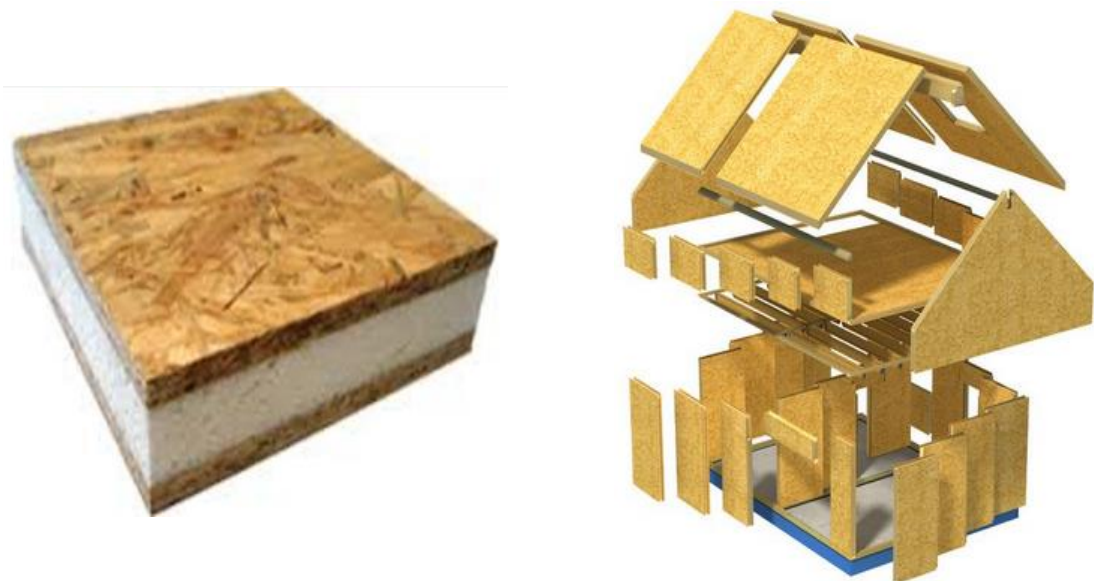


Figura 10 – Painel SIP (à esquerda) (25). Esquema ilustrativo da construção recorrendo a SIPs (à direita) (26).

Depois de toda a estrutura estar montada, aplicam-se os revestimentos à estrutura, sendo que do lado exterior pode-se aplicar uma grande variedade de rebocos e

revestimentos. Do lado interior, o acabamento pode ser executado recorrendo a placas de gesso cartonado. Os painéis e perfis são já fabricados com furação para a passagem da canalização e da eletricidade.

Este método é caracterizado por ser facilmente executável pelo próprio proprietário, se este assim o desejar, uma vez que é construído com base num painel sanduíche que já inclui todos os isolamentos térmicos e acústicos necessários ao conforto no interior da casa.

1.3.4. Fabrico atual de casas modulares pré-fabricadas

Ao longo do século XX, com o grande avanço da industrialização a nível mundial, a necessidade do setor da construção em adaptar-se aos conceitos de racionalização e industrialização inerentes à época era importante. Por estas razões, arquitetos como *Le Corbusier*, *Walter Gropius*, *Alfred Farwell Bemis* viraram os seus estudos para a pré-fabricação e para a construção modular (27).

Em 1919, o arquiteto suíço *Le Corbusier*, num ensaio acerca da “*Mass Production Houses*”, ou seja, a produção em massa de casas, elogia a pré-fabricação de habitações ao invés das casas tradicionais, dando como mais-valia habitações que fossem flexíveis e adaptáveis às necessidades do Homem (27).

De acordo com *Chemiller* (28) citado por Patinha (14), anos mais tarde, em 1921, *Le Corbusier* declara que era preciso que as casas fossem produzidas em série, em fábricas com linhas de montagem tal como a *Ford* montava os seus automóveis. Atualmente, no processo de construção do tipo modular é dada grande importância à fase de conceção. Nesta fase são utilizadas práticas como o *design* para fabrico e montagem (DFMA), utilizado para garantir que as tolerâncias de montagem sejam controladas em todo o processo de fabrico e montagem local (*onsite*).

Nomeadamente, a utilização de *software* CAD avançado, a impressão 3D e sistemas de controlo de fabrico são importantes para que a construção modular seja bem-sucedida.

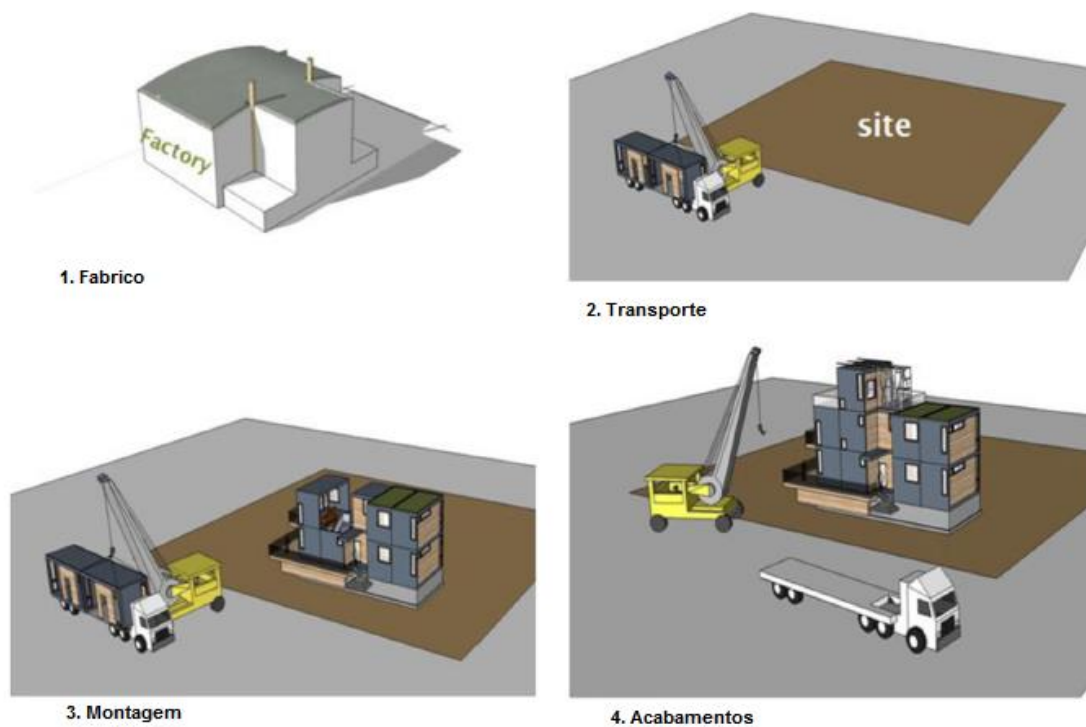


Figura 11 - Processo geral de construção para a construção modular (29).

- **Processo de fabrico:** No processo de fabrico, o trabalho é tipicamente dividido em postos de trabalho, combinando tarefas, possibilitando a construção de diferentes partes em conjunto.
- **Inspecções e processo de aprovação:** Desenhos a definir claramente o que será feito na fábrica (*offsite*) versus o que será feito no local de montagem (*onsite*) são submetidos à aprovação. Medidas de controlo da qualidade são realizadas em cada posto, que podem incluir visitas do arquiteto e ou do cliente. Finalmente, um inspetor é contratado para se certificar de que o trabalho realizado seguiu os desenhos.
- **Método de transporte:** O tamanho dos módulos varia de acordo com o método de envio e do percurso de deslocamento dos componentes.
- **Procedimentos de montagem no local:** Os movimentos e a localização do guindaste, a sequência de instalação dos módulos, e os pontos de ligação para o manuseio necessário devem ser planeados com antecedência.

Segundo um estudo efetuado por *Schoenborn* (8) no qual foram feitas entrevistas a cinco empresas, teste constatou que o método de fabrico difere de fabricante para fabricante, dando como exemplo:

- A empresa A constrói módulos isolados que não são combinados até à montagem final.
- A empresa B constrói uma estrutura monolítica que é dividida em módulos, uma vez concluída.
- As empresas C, D, e E introduziram o *software* BIM (modelo de informação da construção) nas suas linhas de produção, permitindo que as máquinas automatizadas fossem usadas através da extração da informação diretamente a partir dos modelos.

O sistema estrutural e o posterior detalhamento dos módulos geralmente recai sobre de trabalho do fabricante.

1.3.5. Constrangimentos e barreiras no *design* e inovação na construção pré-fabricada modular

Apesar dos benefícios da construção pré-fabricada modular serem conhecidos, este tipo de construção ainda não é muito utilizada.

Estudos mostraram que não existe uma vantagem competitiva relativamente ao uso da construção modular em relação à construção tradicional (30). Tal facto poderá estar relacionado com a existência de um estigma no que diz respeito à falta de qualidade associada à construção modular, tendo como referência um passado de construção modular de baixa qualidade.

Em 2007, um artigo na *Building and Environment* indicava que seria necessário seguir as seguintes estratégias para que a construção modular fosse considerada rentável (31):

- a) Completa mecanização do processo de produção;
- b) Eliminação máxima do trabalho em campo (*onsite*) o quanto possível;
- c) Maximizar o uso de materiais reciclados para componentes de construção pré-fabricada;

Nos últimos 10 anos têm vindo a ser feitos diversos estudos (aqueles feitos por *Lu Na* (32), *McGraw Hill Construction* (33), *Carl T. Haas* (34), *Schoenborn* (8), etc) nos quais identificaram algumas barreiras relativamente à construção pré-fabricada modular.

Em 2012, *Schoenborn* menciona, no seu caso de estudo, as barreiras e os constrangimentos deste tipo de construção com base em diversas entrevistas efetuadas a empresas do ramo, sendo estas as seguintes:

1) A perceção negativa do mercado com base em precedentes construídos.

A conotação negativa associada a este tipo de construção advém da associação a construção pobre e insegura. Historicamente, o setor foi orientado para a construção de soluções de construção temporárias para necessidades imediatas, no entanto, hoje em dia, a indústria reconhece a necessidade de uma construção durável, mesmo que para usos temporários.

Assim, a falta de conhecimento dos consumidores sobre o que é possível pode impedir a inovação no *design*.

A fim de ultrapassar o estigma, por vezes associado à construção modular, os fabricantes tentam oferecer um produto construído indistinguível de um construído com as técnicas tradicionais.

2) Os elevados custos iniciais agravados pela falta de conscientização dos clientes acerca das potenciais vantagens financeiras a longo prazo.

Apesar de a construção modular operar sobre um cronograma acelerado e os trabalhadores de fábrica exigirem salários mais baixos do que os trabalhadores da construção no local, a poupança será geralmente descompensada devido aos altos custos do transporte. Os custos do projeto também serão maiores, pois o processo exige fases de conceção e desenvolvimento documentado prolongado. A expectativa dos consumidores de que estarão a adquirir um produto mais barato limita assim, o potencial de inovação do *design*.

Como constrangimentos (8) tem-se que estas dizem respeito, principalmente:

3) Aos diferentes processos de fabrico de fabricante para fabricante.

No estudo mencionado, cada empresa possuía o seu método de fabrico, existindo diferenças significativas.

Esta falta de transparência em relação aos meios e métodos de construção pode ser considerada uma restrição para projetar inovação.

4) Falta de conhecimento dos processos de produção entre os arquitetos.

Os dados adquiridos por *Schoenborn* no seu estudo demonstram que existe um desejo por parte dos fabricantes de educar os arquitetos, informando-os sobre o que é e o que não é possível na construção modular, sendo esta uma tarefa tanto ou quanto complicada uma vez que o processo de fabrico varia de fabricante para fabricante, como referido no ponto anterior.

5) Ao maior nível de detalhe e ao compromisso de tempo exigido antecipadamente para o desenvolvimento dos desenhos necessários para o fabrico.

Os desenhos do processo de fabrico são normalmente criados, além dos documentos da construção. Esta duplicação de trabalho dá razão ao fato de que os desenhos de construção de um arquiteto são tipicamente inadequados para a construção modular. De modo a melhorar a eficiência, os desenhos do processo de fabrico e os documentos de construção deveriam ser fundidos (8).

Passar mais tempo inicialmente em desenhos detalhados seria uma mais-valia para melhorar a eficiência, aumentar a velocidade de trabalho e diminuir o custo total.

6) Como a abordagem para a aquisição de trabalho afeta as responsabilidades das partes interessadas.

Devido à natureza da conceção e da construção na construção modular, é necessária uma estreita comunicação entre o fabricante e o arquiteto desde o início do projeto. Por exemplo, mais trabalho feito na fábrica (*offsite*) dá um maior grau de controlo sobre a velocidade e a qualidade da construção ao fabricante, mas diminui a contribuição do empreiteiro geral no local de montagem (*onsite*), não sendo otimizado o fluxo de trabalho.

7) Ao conhecimento de programação necessária para a utilização de máquinas que funcionam com CAM, limitando o uso de automatização na fábrica.

A disponibilidade de máquinas operadas por CAM põe em causa se um processo industrializado pode ser aplicado à construção pré-fabricada modular semelhante à maneira pela qual os automóveis são fabricados.

A construção modular proporciona um ambiente de trabalho estático, dividindo construção numa série de tarefas isoladas. Um processo de fabricação totalmente automatizado está dependente de um grande volume de demanda, um nível de que não é normalmente disponível na construção civil. Por conseguinte, a aplicação de máquinas dedicadas para funções singulares é utilizada quando possível.

O problema é que o *software* CAM, hoje, é geralmente inadequado para a manipulação de trabalho de projetos personalizados. Tais programas não têm a capacidade de personalização que o *software* CAD tem, por isso a repetição é fundamental.

8) Ao tamanho dos módulos e às limitações do peso com base no método de envio.

O fabrico de componentes fora do local de montagem (*offsite*) levanta imediatamente a questão do modo de transporte disponível para o envio. Os custos poupados, acumulados desde o processo de fabricação, são muitas vezes descompensados pelos custos do transporte. Por este motivo, é importante refletir sobre qual será a solução com melhor custo-benefício no momento de decidir o tamanho e a estrutura dos módulos. Os pontos seguintes incluem fatores afetados por restrições de transporte (8):

- As estruturas modulares transportadas num camião são limitadas em comprimento, largura e peso com base na capacidade física do veículo
- Os componentes que cabem em contentores de carga são os mais adequados para projetos no exterior, porque a integridade estrutural dos recipientes permite empilhamento desorganizado. No entanto, os componentes são limitados pelas dimensões interiores do contentor em comprimento, largura e altura.

1.3.6. Casas pré-fabricadas do tipo modular e sustentabilidade

Como construção sustentável considera-se como sendo aquela que “promove intervenções sobre o meio ambiente, sem esgotar os recursos naturais, preservando-os para as gerações futuras” (1). Neste conceito privilegia-se a utilização de materiais sustentáveis e de soluções tecnológicas inteligentes que promovam o uso racional da água e da energia, sem comprometer o conforto dos utilizadores.

Na construção tradicional, a questão dos desperdícios gerados e da quantidade de recursos absorvidos torna-se ainda mais relevante quando, segundo *Yeang* (35) citado por *Greven e Baldauf* (13) este sector é responsável pelo consumo de cerca de 40% das matérias-primas produzidas no mundo, e pela produção de 20 a 26% do lixo acumulado anualmente em aterros.

A utilização da construção modular permite uma racionalização de tempo, de custos e de desperdícios, podendo contribuir para o desenvolvimento de sistemas construtivos mais sustentáveis e económicos (14). O controlo da qualidade, a gestão de resíduos produzidos e a racionalização de consumos é mais exequível nas casas modulares, uma vez que os módulos são produzidos em fábricas que habitualmente obedecem a normas rigorosas de controlo da gestão, rotulagem e desempenho ambiental e também de controlo de qualidade entre outras, que permitem ir de encontro aos princípios básicos para a sustentabilidade aplicada à construção.



Figura 12 - Livinghome Rk1 (2006) (36).

A *Livinghome Rk1* (16) foi a primeira casa pré-fabricada a receber o Prémio *Leadership in Energy and Environmental Design (LEED)*, que consiste numa certificação para edifícios sustentáveis. Esta é construída com módulos tipo torre produzidos sobre estruturas de aço e inclui um sistema de recolha de água da chuva para utilização no jardim, células fotovoltaicas, alguns envidraçados de policarbonato e uma ventilação mais favorável nas casas de banho. Possui também vegetação no interior para melhorar a qualidade do ar interior (1).



Figura 13 - *Stillwater dwellings* (2008) (37).

Como a maioria das empresas de construção pré-fabricada, a sustentabilidade do *Stillwater* (38) começa no processo de fabrico. No entanto, estas casas também incorporam a mais recente tecnologia de economia de energia. A parede composta por multicamadas cria uma barreira apertada de modo a impedir os elementos exteriores de entrar e a energia de escapar. As casas apresentam também uma bancada de vidro reciclado e painéis fotovoltaicos para conversão solar.



Figura 14 – *Q-House* (2009) (39).

A *Q-House* (40) da empresa de arquitetos *Asensio_Mah* é personalizável com componentes em forma de escudo, janelas, portas, materiais, plataformas e acessórios. Neste conceito, forma e função combinam lindamente, criando um resultado impressionante. É um produto de construção verde, apresentando recursos como água quente solar, materiais recicláveis e aparelhos energeticamente eficientes.



Figura 15 - Paradigm House (2012) (41).

A *Paradigm House* de *Bogue Trondowski Architects* (41) deu nas vistas no *Greenbuild 2012*, em San Francisco na Califórnia. Estas casas são projetadas para não terem nenhum consumo de energia e de água, indo de encontro às normas LEED (categoria Platina), Casa Passiva (“*Passivhaus*”) e do Desafio Edifício Vivo, tendo sido classificado com 6 em 7 pétalas, visto que os modelos são ajustados às condições específicas do local. Muitas das características destas habitações enaltecem o ambiente, incluindo um painel solar, um coletor de água da chuva, uma estufa e uma casa de banho ecológica. Para além destas características, estas possuem um isolamento muito eficaz, nomeadamente no telhado. Os materiais e os equipamentos escolhidos para construir estas casas são muito sustentáveis e a iluminação é LED (41).



Figura 16 - Archi + Carbon Positive House (2015) (42).

A empresa australiana *ArchiBlox*, especialista em construção modular, desenvolveu um protótipo para a primeira casa compacta carbono-positivo, com paredes com plantas, um solário e um telhado isolado também este coberto com relva. Esta casa foi projetada para produzir mais energia do que o que consome. Ao longo da sua vida útil, espera-se que sejam oferecidos os mesmos benefícios ambientais que 6.095 plantas nativas australianas (42). Por trás da fachada envidraçada, uma marquise abrange a largura do edifício, criando uma zona isolada, virada a norte, criando uma bolsa de ar quente que ajuda a isolar o interior durante os meses frios do inverno, mas que também protege os espaços principais da luz solar durante o verão, sendo chamados de “pulmões da casa”. Foram também adicionados tubos de arrefecimento no chão, destinados à criação de um fluxo cruzado de ventilação, puxando o ar perto do chão. A casa foi projetada para o uso da energia solar através de uma série de painéis fotovoltaicos instalados no telhado. A reciclagem da água da chuva também faz parte do produto, ajudando a reduzir o consumo de água (42).

Nas casas modulares em cima mencionadas é bastante evidente a abordagem a questões de cariz energético e de conforto térmico, realçando, a preocupação em obter casas acolhedoras, funcionais e sustentáveis. Apesar da diversidade, a maior parte destas casas foram projetadas para climas temperados. Deste modo, considera-se ser fundamental a realização de um estudo das adaptações necessárias de modo a ser obtido conforto térmico para outros tipos de clima. Mais

recentemente foram feitos estudos nesta mesma vertente, nomeadamente Gama (1), que efetuou um estudo acerca da análise do desempenho térmico de casas modulares pré-fabricadas para o clima tropical quente.

Para além do conforto, outro fator a ter em conta é a inércia térmica, neste caso do módulo habitacional. Este conceito é conhecido como sendo a capacidade de contrariar as variações de temperatura no interior, ou seja, de reduzir a transferência ou transmissão de calor (43). Este é um dos parâmetros mais importantes para a melhoria das condições de conforto térmico, bem como para reduzir o aquecimento e arrefecimento demanda de energia dos edifícios (44) (45), sendo um dos aspetos a ter em consideração e que serão falados em mais pormenor no capítulo 5.

1.3.6.1. Construção bioclimática

O conceito de construção bioclimática embora pareça um conceito novo é na verdade tradicionalmente utilizado desde a antiguidade. São exemplo, o desenho das cidades romanas de acordo com a orientação solar, as casas caiadas no Sul de Portugal e os pátios interiores de origem árabe (46). É no entanto, em meados do século XX, que este conceito começa a ser mais falado, tendo surgido inicialmente a expressão “Projeto Bioclimático” durante um congresso acerca de arquitetura vernacular (tipo de arquitetura construtiva com técnicas regionais), na Universidade de *Princeton*, onde os irmãos *Olgay* eram professores, tendo sido publicado em 1963 o livro “*Design with Climate*” (47), no qual encontram-se alguns dos princípios da construção bioclimática existentes até à época.

Este conceito consiste em desenvolver um edifício numa lógica de sustentabilidade, desde a fase de projeto, conceção, utilização e fim de uso (48). Para tal, são consideradas as condições climáticas, utilizando os recursos disponíveis na natureza, como por exemplo, o sol, a vegetação, a chuva e o vento de modo a minimizar os impactos ambientais e reduzir o consumo energético (46). Deste modo, consegue-se um edifício adaptado às características ambientais locais, energeticamente eficiente, alcançando facilmente níveis de conforto térmico a cada

espaço com um baixo consumo de energia. Deste modo, cada edifício possui assim uma identidade própria (48).

As estratégias a adotar num determinado edifício ou projeto deverão ser selecionadas tendo em atenção a especificidade climática do local, a orientação solar, função do edifício e consequentemente, modo de ocupação e operação do mesmo, entre outros fatores, são contabilizados de modo a otimizar soluções e tirar partido das suas potencialidades com o objetivo de promoverem um bom desempenho energético contribuir para o conforto higro-térmico (49).

Como já mencionado, a adaptação às características ambientais locais é fundamental, sendo o Sol um dos principais fatores a ser considerado uma vez que é a fonte de energia (quer em termos térmicos, quer em termos de iluminação) presente em todo o processo e que, com o seu devido aproveitamento, será a peça chave para alcançar o conforto interior com medidas passivas, ou seja, sem que seja necessário consumo de energia.

A orientação conveniente do módulo e o seu isolamento adequado e de modo eficiente, ou seja, preferencialmente pelo lado exterior e de modo contínuo, contribuem para atenuar as trocas térmicas entre o interior e o exterior.

A escolha dos materiais a utilizar deve ser criteriosa, de modo a que estes sejam amigos do ambiente e com pouca energia incorporada.

É também importante dimensionar corretamente as superfícies envidraçadas assim como protegê-las. Ou seja, ter em atenção a orientação solar para fazer o melhor aproveitamento dos ganhos térmicos e também ter em conta as necessidades de iluminação para cada divisão. O tipo de caixilho, o tipo de vidro e o tipo de sombreamento irão permitir maiores ou menores trocas térmicas entre o interior e o exterior. Deste modo, os vidros devem ser duplos e os caixilhos devem ser eficientes (48).

É também vantajoso desenvolver estratégias passivas para alcançar o conforto interior, uma vez que contribuirá para o bom desempenho energético do módulo habitacional.

São considerados sistemas passivos, dispositivos construtivos integrados nos edifícios de modo a promover o aquecimento ou o arrefecimento do interior

naturalmente, sem que seja necessário recorrer ao consumo de eletricidade ou de algum tipo de combustível, tirando apenas partido das características climáticas. Posto isto, é considerado vantajoso desenvolver estratégias passivas para alcançar o conforto interior uma vez que contribui para o bom desempenho energético do edifício. Estas vão desde o controle da radiação solar (facilitando os ganhos ou perdas térmicas), tirar partido da inércia térmica do edifício, promover o isolamento térmico de toda a envolvente construída, isto é, paredes, pavimentos e coberturas, minimizando assim as trocas térmicas entre o ambiente interior e exterior, até à selecção de superfícies envidraçadas eficientes e ao seu sombreamento adequado, como já referido. Os sistemas passivos nem sempre conseguem dar resposta a todas as necessidades energéticas. Para colmatar estas necessidades recorre-se a sistemas ativos, sendo que estes deverão recorrer a fontes de energia renováveis.

Em relação aos sistemas de aquecimento, estes tentam maximizar a captação de energia usando-a direta ou indiretamente, no momento da captação ou armazenando para usar quando necessário. Os sistemas de aquecimento passivo podem ser de ganho direto (envidraçado), indireto (paredes de trombe, parede massiva, colunas de água) ou isolado (espaço estufa) (1).

Os sistemas de arrefecimento tentam utilizar fontes de arrefecimento tais como o solo, que se encontra sempre a uma temperatura inferior à da superfície, e o ar exterior, que apresenta uma temperatura inferior à do interior do edifício em determinadas horas do dia (1). Os sistemas de arrefecimento evaporativo (provocado pela evaporação da água) e radiativo (emissão de radiação/calor pelos elementos envolventes do edifício) também são opções possíveis. Exemplos de sistemas de arrefecimento passivo são a ventilação natural, arrefecimento pelo solo, arrefecimento evaporativo e radiativo.

1.4. Resumo e conclusões do capítulo

Ao longo do século XX foram feitas diversas tentativas no sentido de desenvolver protótipos de casas pré-fabricadas para produção em massa tendo obtido pouco sucesso.

Nesse sentido, nos últimos anos tem havido um interesse renovado na integração da pré-fabricação e da pré-montagem de modo a melhorar a qualidade, a segurança e a economizar o tempo da construção, evitando o desperdício de material, assim como o impacto sobre o meio ambiente.

Nas casas pré-fabricadas modulares atuais, a questão da sustentabilidade tem sido abordada privilegiando-se a utilização de materiais sustentáveis e soluções tecnológicas inteligentes que promovem o uso racional da água e da energia, sem comprometer o conforto dos utilizadores.

No entanto, apesar das vantagens evidentes existentes na construção pré-fabricada do tipo modular este método de construção ainda apresenta algumas barreiras no que concerne (8):

- 1) À percepção negativa do mercado em relação a este tipo de construção com base em precedentes construídos (economia, gestão e marketing; saúde e ambiente);
- 2) Aos elevados custos iniciais agravados pela falta de conscientização dos clientes acerca das potenciais vantagens financeiras a longo prazo (economia, gestão e marketing);

Como constrangimentos (8) tem-se que estas dizem respeito, principalmente:

- 3) Aos diferentes processos de fabrico de fabricante para fabricante (engenharia e *know how*; legislação e regulamentação);
- 4) À falta de conhecimento dos processos de produção entre os arquitetos (engenharia e *know how*);
- 5) Ao maior nível de detalhe e ao compromisso de tempo exigido antecipadamente para o desenvolvimento dos desenhos necessários para o fabrico (engenharia e *know how*);
- 6) Como a abordagem para a aquisição de trabalho afeta as responsabilidades das partes interessadas (economia, gestão e marketing);

- 7) Ao conhecimento de programação necessária para a utilização de máquinas que funcionam com CAM, limitando o uso de automatização na fábrica (engenharia e *know how*);
- 8) Ao tamanho dos módulos e às limitações do peso com base no método de envio (economia, gestão e marketing; engenharia e *know how*).



Figura 17 – Esquema resumindo os critérios necessários para a inovação da construção pré-fabricada modular (50).

Considera-se assim que, para que a construção modular tenha sucesso e consiga ter um determinado grau de inovação, esta deverá englobar uma abordagem orientada a processos, respondendo ao contexto ambiental, a uma estrutura organizacional e à capacidade digital e material de fabricação (50).

No contexto ambiental, o projeto deve ser feito tendo em conta as especificações climáticas do local onde será construída/montado o módulo habitacional. Os materiais devem ser sustentáveis e devem ser implementadas tecnologias e estratégias que possam diminuir o consumo energético.

No que toca à estrutura organizacional, cada vez mais é importante que exista o planeamento adequado na fase inicial do desenvolvimento do produto, assim como a implementação de técnicas modulares que sejam integradas desde o início do processo de *design*, respondendo à capacidade de fabricação, no que concerne ao processo de desenvolvimento num software indicado e no processo de fabrico.

Concluiu-se também que de modo a combater constrangimentos associados ao transporte da casa, o melhor sistema pré-fabricado a aplicar serão estruturas em painel.

1.5. Contributo do trabalho

Tendo em conta o objetivo desta dissertação e a revisão bibliográfica efetuada, estabeleceu-se como principal contributo do presente trabalho, o desenvolvimento de um módulo habitacional que responda a questões que têm sido vistas como constrangimentos na construção modular, são exemplo disso a questão do tamanho e do peso dos módulos, associados ao transporte dos mesmos e por fim, a questão relacionada com a perceção negativa do mercado relativamente a este tipo de construção. Nesse sentido, o contributo deste trabalho é projetar um módulo que seja fácil de transportar e que caiba eventualmente num contentor marítimo, recorrendo-se a materiais sustentáveis e à promoção da utilização de tecnologias que possam diminuir o consumo energético sem comprometer o conforto térmico no interior.

Para o estudo do produto foi necessário recorrer a ferramentas de desenvolvimento do produto, com base nos quais foram determinadas e quantificadas as especificações do produto.

De modo a testar os materiais efetivos, o passo seguinte consistiu no estudo e na especificação de soluções construtivas para o módulo pré-fabricado de modo a que estas fossem compatíveis com as exigências dos climas escolhidos com base em critérios económicos.

Para o efeito, recorreu-se à ferramenta *DesignBuilder* de simulação dinâmica de edifícios, considerando perfis de utilização pré-definidos assim como países cujos climas fossem considerados representativos.

1.6. Estrutura da dissertação

Esta dissertação é composta por sete capítulos. O primeiro capítulo no qual é feita uma contextualização do estudo, onde é mencionado o objetivo do trabalho e os principais contributos. São abordados também os principais constrangimentos da construção modular e o processo de fabrico em geral. E porque cada vez mais este tipo de construção encontra-se associado ao conceito de sustentabilidade são

referidos alguns exemplos de casas onde são aplicados conceitos sustentáveis e bioclimáticos.

No segundo capítulo é feito uma breve referência à história das casas pré-fabricadas modulares, sendo referidos alguns marcos da arquitetura modular divididos por períodos considerados como tendo sido os mais marcantes e que de certa forma mais contribuíram para o desenvolvimento e inovação deste tipo de construção.

No terceiro capítulo são apresentados os critérios e os constrangimentos tidos em conta no desenvolvimento do conceito da casa modular e o estudo do possível dimensionamento dos painéis que a constituem tendo em conta as dimensões de veículos de transporte de cargas pesadas e de contentores marítimos. São também determinados os diferentes climas e países representativos para os quais a casa foi projetada.

O quarto capítulo é orientado para a vertente do desenvolvimento do produto, no qual são determinadas e qualificadas as necessidades funcionais, estéticas, de conforto, de eficiência energética e regulamentares do módulo habitacional, utilizando ferramentas diretamente relacionadas com a vertente em questão, como por exemplo, a Matriz da Qualidade e do Produto e o modelo do Esquema do Design do Produto. É também neste capítulo que é apresentado o modelo da casa modular de referência no estudo após o estudo do produto.

No quinto capítulo tendo em conta os climas escolhidos no capítulo 3, são feitas diversas simulações utilizando o programa *DesignBuilder* de modo a estudar o desempenho higro-térmico e energético, tendo em consideração diferentes configurações dos materiais, localizações/orientações, percentagem de envidraçados, perfis de operação, entre outros. São também apresentados todos os resultados e respetiva discussão.

No sexto capítulo são apresentadas as propostas finais e alguns pormenores relativos a projetos de especialidade, assim como os custos.

O último capítulo deste trabalho refere-se às conclusões finais do trabalho e à sugestão de trabalhos futuros.

2. Breve história da evolução das casas modulares

2.1. Sumário

Neste capítulo é apresentada a perspectiva histórica da construção modular e respetivos conceitos subjacentes.

Para tal foi feita pesquisa e recolha de informação no que diz respeito à evolução do conceito ao longo dos tempos, dando-se um maior ênfase da segunda metade do século XX até à atualidade.

Atualmente o conceito de pré-fabricação e de modularidade está diretamente ligado ao conjunto de inovações tecnológicas e de novos materiais mas nem sempre foi assim, estando as origens da construção pré-fabricada nem relacionadas com fábricas ou materiais produzidos em massa.

Durante a Segunda Guerra Mundial este tipo de construção, considerada rápida e acessível em termos de preço, permitiu que soldados fossem alojados em abrigos móveis e posteriormente foi amplamente utilizada na geração de subúrbios confortáveis para soldados retornados.

Recentemente têm sido feitos progressos recentes, quer por arquitetos como por empresas dedicadas a este tipo de construção, em achar novas aplicações para além do conceito de casa familiar.

2.2. Período do colonialismo britânico

A construção pré-fabricada em si remonta a 1624, quando uma casa desmontada foi enviada de Inglaterra para *Cape Ann*, em *Massachusetts*, de modo a abrigar uma frota de pesca utilizando técnicas inglesas de construção, familiar aos colonos que haviam acabado de chegar à América (51).

Duzentos anos depois, em 1830, surgiu o sistema de armação em balão (*Balloon frame*) que acabaria por revolucionar a construção, na medida em que novas moradias poderiam ser mais rapidamente construídas. Na época o material

utilizado era a madeira e este método permitia a construção de grandes áreas com um custo mínimo sem comprometer o aspeto do edifício, possibilitando uma grande variedade de estilos arquitetónicos (52).

2.3. Da Revolução Industrial à Primeira Guerra Mundial

Como resultado da Revolução Industrial na Inglaterra, a partir de meados do século XVIII, e respetiva expansão, o desenvolvimento de novos equipamentos e de técnicas de processamento de materiais permitiu uma utilização diferente e mais sistematizada de materiais como o aço e o vidro. O aparecimento da indústria permitiu também a produção em série de elementos construtivos pré-fabricados de forma mais rápida, eficiente e de forma padronizada (14).

No início do século XX, arquitetos e engenheiros encontravam-se a braços com a questão de como abrigar uma população em rápido crescimento de forma eficiente.

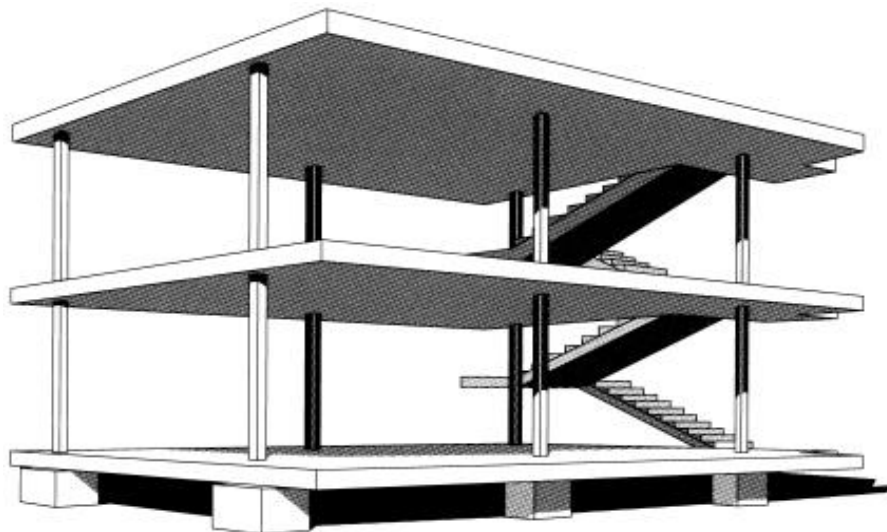


Figura 18 - Dom-ino House (1914) (53).

No início da Primeira Guerra Mundial, o projeto modernista *Dom-ino House* de *Le Corbusier*, em 1914, propôs uma estrutura em betão armado simples suportada por vigas esbeltas. Barato e de fácil reprodução, o projeto explorou conceitos de habitação simples, embora nunca tenha sido construído (54).

A pré-fabricação foi viabilizada com o avanço das técnicas de produção e equipamentos para transporte e montagem (55).

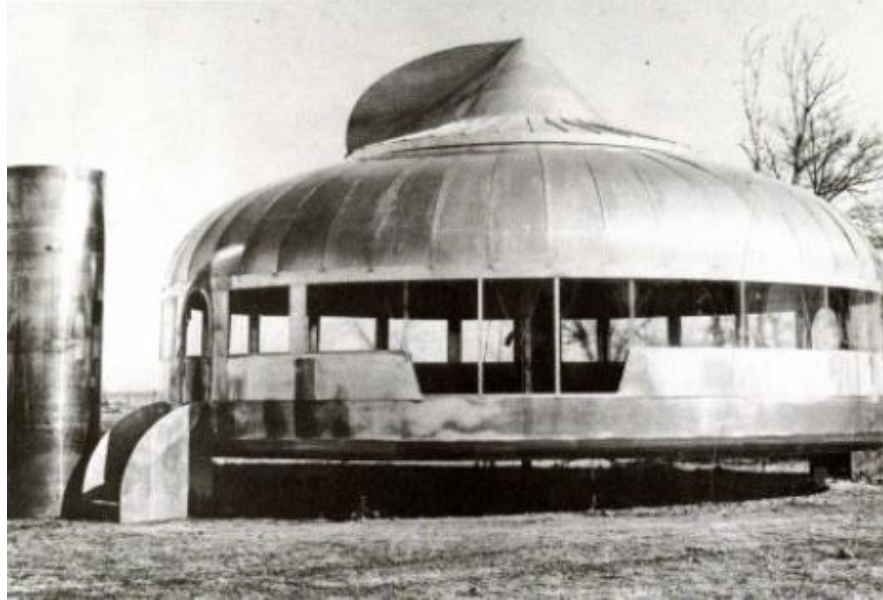


Figura 19 – *Dymaxion House* (1930) (8).

A *Dymaxion House* foi desenvolvida pelo inventor e arquiteto *Buckminster Fuller* em 1930 e redesenhada em 1945, sempre com o intuito de solucionar as diversas deficiências técnicas da construção das casas existentes (56).

A consideração de *design* fundamental do projeto foi a facilidade de transporte e de montagem. Assim, uma vez que a casa era totalmente desmontável, toda a casa foi sendo atualizada quando novos modelos eram criados (57). Estas versões da casa foram sendo projetadas em momentos diferentes, todas elas *kits* fabricados em fábrica, montados no local, destinados a serem adequados a qualquer local ou ambiente e a utilizar os recursos de forma eficiente.

Relativamente ao material escolhido por *Fuller* para a *Dymaxion House* foi o alumínio (alvo de algumas críticas na altura) pelo seu peso leve, grande resistência e durabilidade a longo prazo, fatores que compensariam o custo inicial da produção.

2.4. A Segunda Guerra Mundial e o pós-guerra

Foi no entanto na Segunda Guerra Mundial que a construção pré-fabricada começou a ganhar mais importância, permitindo que os soldados fossem alojados em abrigos móveis e que fossem gerados subúrbios habitacionais confortáveis para os retornados.

A procura de casas era maior do que o mercado poderia lidar com o processo de construção tradicional, o que levou as pessoas a procurar soluções para aumentar a eficiência e reduzir os custos associados à construção das novas residências. Deste modo a construção modular respondeu a ambas as necessidades (58).



Figura 20 – Nissen Hut (1945) (59).

Na Alemanha, 25% das habitações foram destruídas nos bombardeamentos, tendo sido necessário abrigar 12 milhões de refugiados de antigos territórios alemães na Europa Oriental, tendo sido amplamente utilizado o *Nissen Hut*, uma forma de casa pré-fabricada simples, constituída por chapa ondulada e similar ao *Quonset Hut* (58).

Na França, na época do pós-guerra, de modo a combater a escassez de habitação, recorreu-se também às casas pré-fabricadas. Em 1948, o arquiteto francês *Jean Prouvé* foi responsável pela construção de 800 abrigos de emergência que poderiam ser facilmente desmontados, conhecidos por "*Maisons à Portique*". Apenas 400 casas foram de facto construídas, sendo estas construídas por uma estrutura de aço axial.



Figura 21 –*Ferembal Demountable House* (1948) (60).

A *Ferembal Demountable House* do francês *Jean Prouvé* (1948) foi concebida originalmente como escritórios para o fabricante de bens de estanho de mesmo nome em Nancy. Esta é um exemplo por excelência da abordagem inventiva de *Prouvé* na qual a estrutura de aço curvado compreende cinco pórticos axiais de aço definidos num piso de aço e que formam um núcleo estrutural em conjunto com vigas cume que suportam a cobertura de alumínio. Os painéis pré-fabricados de madeira foram utilizados para a fachada e também para o caso do jardim de inverno e para as paredes internas (60).

Resgatada da demolição do local da *Ferembal*, a casa é um exemplo notável e eloquente das virtudes técnicas e funcionais de seus projetos pré-fabricados, assim como a sua capacidade de adaptação. Em 2010, por iniciativa da *Galerie Patrick Seguin*, *Jean Nouvel* adaptou e modularizou este edifício, atestando a relevância duradoura do *design* e da prática de *Prouvé* (61).

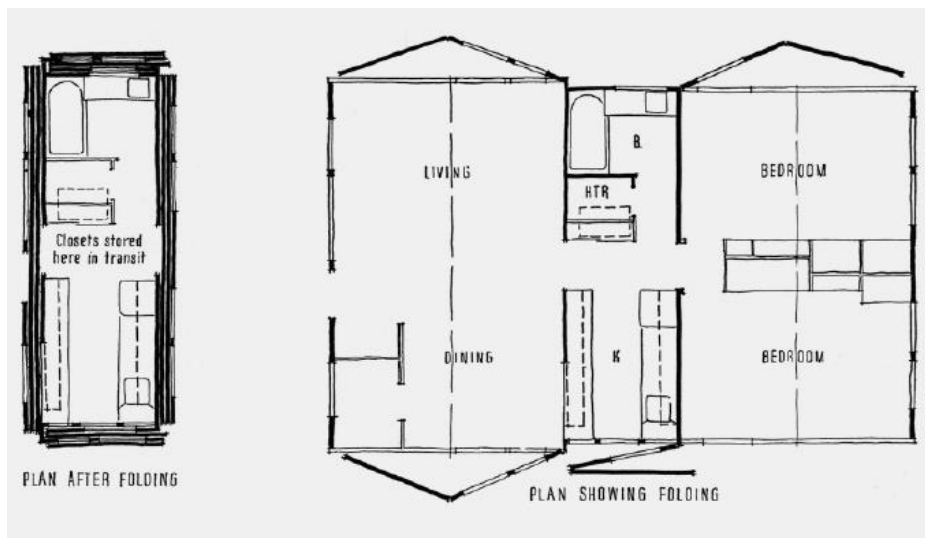


Figura 22 – Planta da *Acorn House* (1948) (8).

A *Acorn House* do arquiteto norte-americano *Carl Koch* do ano de 1948 (62) consistia em compartimentos dispostos ao redor de um núcleo central constituído pela casa de banho e pela cozinha, por um chassis de aço e com o exterior formado por painéis dobráveis. Rodando sobre as dobradiças formavam-se as paredes exteriores, o piso e a cobertura, criando os quartos, a sala de jantar e a sala. Este sistema facilitava o transporte para o local de montagem uma vez que cabia num camião. Embora *Koch* tenha experimentado a ideia de uma fundação desmontável, este optou por uma fundação de betão elevando um pouco o chassis de aço do chão (63).

2.5. A segunda metade do século XX

A demanda estava no seu auge nos anos 50, 60 e no início dos anos 70 na Europa Oriental e Ocidental com a construção de novas cidades, subúrbios, existindo um desenvolvimento de larga escala na habitação pública.

a) Década de 1950



Figura 23 - *Maison Tropicale* (1951) (64).

A *Maison Tropicale* de *Jean Prouvé* de 1951, projetada para resolver a escassez de habitação e de edifícios públicos nas colónias francesas em África, é uma espécie de cabana tropical desmontável em alumínio (1) (14).

Foram criados e fabricados três protótipos entre 1949 e 1951. Uma casa foi para Niamey, capital do *Niger*, e duas para *Brazzaville*, no Congo.



Figura 24 - Farnsworth House (1951) (65).

Em 1951, o arquiteto alemão naturalizado americano, *Ludwig Mies van der Rohe* cria a *Farnsworth House*, localizada na cidade de Plano, Illinois, nos Estados Unidos (65). Constituída por uma estrutura metálica e por duas lajes de betão armado, sustentadas por oito pilares de aço. O piso é suspenso, suportado por estes pilares, como se a casa flutuasse sobre o terreno. A cobertura é uma laje como a do piso. As paredes externas da residência são de vidro e as internas de madeira. Apesar do aspeto vanguardista, esta peca pelos problemas de conforto térmico.

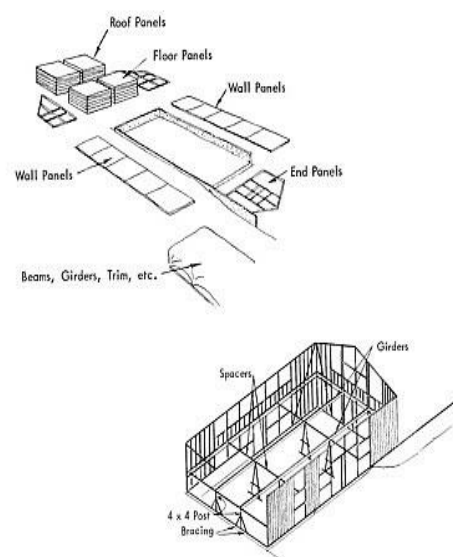


Figura 25 – À esquerda: Techbuilt House (1953) (66). À direita: esquema de montagem da Techbuilt House (63).

Em 1953, *Carl Koch* desenvolve o seu projeto de habitação pré-fabricada melhor sucedido chamado de Sistema *Techbuilt* (66).

A *Techbuilt House* era mais harmoniosa com os gostos urbanos e com as configurações na época comparadamente com o trabalho anterior, a *Acorn House*. Neste tipo de habitações *Koch* optou por utilizar materiais naturais como a madeira, por projetar interiores alargados e por colocar o telhado inclinado e com beirais. Seis modelos diferentes foram projetados e pelo menos três casas foram construídas nos Estados Unidos (62).

b) Década de 1960

A década de 1960 trouxe também uma tendência crescente de compra de casa móveis, assim como de habitações modulares para acomodar as necessidades das famílias de baixa renda.



Figura 26 - Habitat '67 (1967) (67).

Em 1967, o arquiteto israelo-canadiano *Moshe Safdie* cria o projeto *Habitat '67*, construído para a Exposição Universal de Montreal (Expo 67). O grande edifício de apartamentos consiste em módulos individuais feitos de betão pré-moldado e que encaixam-se como um puzzle (68). Este projeto foi concebido para ser facilmente repetido uma vez que os módulos podem ser montados em qualquer lugar,

independentemente da localização. Apesar dos planos do arquiteto o projeto nunca foi construído em outro lugar, mas a pré-fabricação e a modularidade foram ganhando cada vez mais interesse.



Figura 27 – *La Bulle Six Coques* (1967) (à esquerda e à direita) (69).

Em 1967, o arquiteto francês *Jean Maneval* cria a *La Bulle Six Coques*, constituída por seis carcaças, tendo sido utilizada para uma colônia de casas de férias nas montanhas dos Pirenéus.

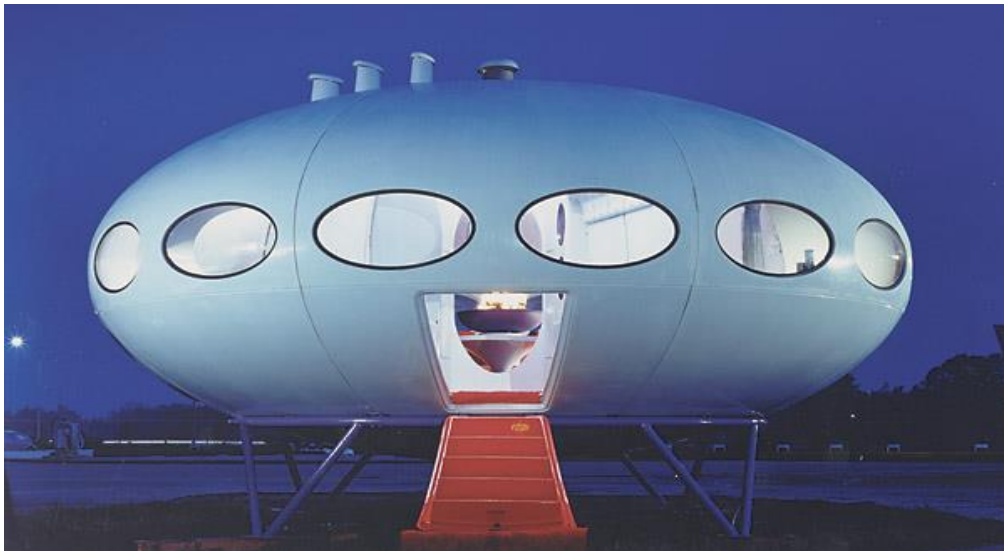


Figura 28 – *Futuro House* (1968) (70).

Em 1968, são criados os pavilhões chamados *Futuro* (70), projetado pelo arquiteto finlandês *Matti Suuronen*, constituídos por poliéster reforçado por fibra de vidro.

c) Década de 1970

O movimento ecológico da década de 1970 trouxe um fim à euforia do progresso tecnológico e de arquiteturas futuristas. Nesta época, materiais de construção altamente modernos e que não parecem estar em harmonia com um retorno à natureza, como o plástico ou o alumínio, caíram em descrédito. Esta situação foi ainda agravada pelo facto de elementos pré-fabricados terem sido utilizados para a construção de habitação massificada, que é nesta época geralmente vista de forma negativa.



Figura 29 – *Venturo House* (1971) (71).

Em 1971, o arquiteto polaco *Matti Suuronen* cria a *Venturo House*, modular e transportável. As paredes e a cobertura são feitas de fibra de vidro com dupla camada de espuma de poliuretano de dois centímetros de espessura e o piso é feito de madeira (72).

Em 1972, o arquiteto japonês *Kisho Kurokawa* constrói a *Nakagin Capsule Tower*, em Tóquio. As células habitacionais foram mergulhadas em torno de um núcleo de betão pré-fabricado de modo a formar uma torre residencial de catorze andares (73).

A ideia de mega estruturas de cápsula residenciais foi revivida em 1974, em Jerusalém, com a *Ramot Polin* de *Zvi Hecker* (74).

d) Década de 1980

Os anos 80 trouxeram um interesse renovado em aplicações urbanas para as práticas de construção modular e de pré-fabricação. No final da década, os projetos das casas modulares foram sendo modificados de modo a restringir as configurações espaciais de largura e comprimento dos módulos, de modo a permitir o seu transporte rodoviário.

À medida que os construtores tornavam-se mais criativos, as opções de *design* aumentaram, permitindo uma grande variedade de estruturas e combinações a vários níveis (75).



Figura 30 – Yacht House (1984) (76).

Em 1984, o arquiteto inglês *Richard Horden* adotou um mastro de alumínio utilizado como um elemento de suporte de carga na sua *Yacht House*. Esta estrutura leve da construção naval suspende os painéis do teto e da parede a partir deste. A *Yacht House* é de montagem simples e a sua construção envolveu componentes normalizados. Esta casa foi, de certo modo, projetada para ser produzida em massa, não tendo sido, no entanto, tomadas medidas necessárias no sentido de iniciar a produção (76).

e) Década de 1990

Na década de 1990, os consumidores e até mesmo os arquitetos e construtores começaram a aderir à construção modular devido à sua conveniência, baixo custo

e eficiência. Lentamente, a construção pré-fabricada emancipou-se da fama da produção em massa e barata, e arquitetos de renome, como *Daniel Libeskind* começaram também a desenhar modelos, posteriormente erguidos segundo os critérios de sustentabilidade mais recentes.

2.6. Construção modular na atualidade



Figura 31 – *weeHouse* (2003) (77).

Do *Rocio Romero LV House* (2000) ou, por exemplo, a *weeHouse* (2003) da *Alchemy Architects* parecem ser as mais recentes reinterpretações do arquiteto *Ludwig Mies van der Rohe* da *Farnsworth House*.



Figura 32 – *Micro Compact House* (2005) (78).

A *Micro Compact Home*, de *Richard Horden*, foi desenvolvida em 2005 e é uma casa funcional e confortável dentro de um cubo com 2,6 metros de largura recorrendo às tecnologias mais avançadas (79). A estrutura é em esqueleto de madeira com exterior em painéis planos de alumínio anodizado e um interior revestido a PVC. As janelas possuem vidros duplos, de modo a garantir um bom isolamento, tendo sido selecionado um isolamento a vácuo especial.



Figura 33 - Quik House (2009) (80).

A versão básica da *Quik House* do arquiteto *Adam Kalkin* de Nova Jérсия é composta por seis contentores de carga reutilizáveis. Os módulos individuais são transportados por camiões e montados usando um guindaste. Este é um exemplo claro de como uma ideia que é interessante do ponto de vista da reciclagem, torna-se problemático, em termos ecológicos devido à emissão de carbono aquando o transporte (80).

2.7. Resumo e conclusões do capítulo

Pode-se dizer que o conceito de construção pré-fabricada remota à época do colonialismo britânico, com a chegada dos colonos britânicos à América e a partir daí novas técnicas relativas a este tipo de construção foram surgindo, tendo sido a madeira o material mais utilizado na época.

Com a Revolução Industrial na Inglaterra, em meados do século XVIII, e sua expansão, e com o aparecimento de novos equipamentos e técnicas de processamento de materiais, passou a existir uma maior oferta de materiais para este tipo de construção como o aço e o vidro. Foi também possível a produção em série de elementos construtivos pré-fabricados de forma rápida.

Na primeira metade do século XX, com a primeira e a segunda guerra mundial, e com a questão de abrigar a população em rápido crescimento de forma eficiente, fez com que começasse a surgir uma maior diversidade de soluções ao nível da pré-fabricação e da modularidade com custos mais baixos.

Na época do pós-guerra, de modo a combater a escassez de habitação, recorreu-se em especial às casas pré-fabricadas, uma vez que eram fáceis de transportar, de montar e mais acessíveis.

Na segunda metade do século XX, com a reconstrução de novas cidades e subúrbios, contribuiu para uma maior adesão a este tipo de construção, verificando-se que cada década é marcada por tendências bastante visíveis, desde ao nível dos materiais ao aspeto exterior, desde períodos mais vanguardistas/futuristas a períodos onde se preza a harmonia com a natureza.

Atualmente existem diversas soluções, sendo cada vez mais os arquitetos e os construtores que aderem a este tipo de construção, existindo também uma maior preocupação ao nível da sustentabilidade.

3. Critérios e constrangimentos de projeto

3.1. Sumário

Neste estudo foram tidos em consideração diversos critérios e constrangimentos de partida relacionados, como por exemplo, o clima para o qual serão projetados os módulos habitacionais, o tipo de meio de transporte, sendo feito um estudo em relação às dimensões de reboques, semi-reboques e contentores marítimos, e também constrangimentos impostos pelo Regulamento Geral das Edificações Urbanas (RGEU) no que se refere às dimensões mínimas dos compartimentos habitacionais.

Tendo em conta os diversos critérios e constrangimentos estudados foi feito também um estudo acerca do dimensionamento de um sistema em painéis.

3.2. Principais critérios e constrangimentos

3.2.1. O Clima

O clima determina em grande medida o tipo de solo e de vegetação natural de uma determinada região e exerce influência sobre o uso da terra. Como já mencionado, este também determina a forma como os edifícios são concebidos e construídos e afeta o consumo de energia num edifício, tendo especial impacto sobre o conforto térmico (81).

Entende-se como clima, o conjunto de condições atmosféricas, caracterizadas pelos estados do tempo e evolução destes, numa determinada região, ao longo de um período suficientemente grande (82). O estado do tempo é um conjunto de fenómenos meteorológicos que identificam um estado da atmosfera num dado instante e num certo lugar, e é descrito por diversas variáveis climáticas tais como a temperatura, a humidade relativa, a velocidade e direção dos ventos e a precipitação (82).

3.2.1.1. Critério de escolha do clima

Ao longo dos anos foram desenvolvidos alguns sistemas de classificação climática, utilizando diferentes variáveis climáticas e índices.

A classificação feita pelo climatologista alemão *Wladimir Köppen* é uma das classificações climáticas mais utilizadas em todo o mundo em áreas como a geografia, a climatologia e a ecologia, tendo sido proposta em 1900. O último contributo para a formulação da classificação de *Köppen* foi dado por *Rudolf Geiger*, em 1961, e ficou conhecido como classificação climática de *Köppen-Geiger*. Nesta classificação, cada clima é definido com base na sazonalidade e em valores médios anuais e mensais da temperatura do ar e da precipitação (83).

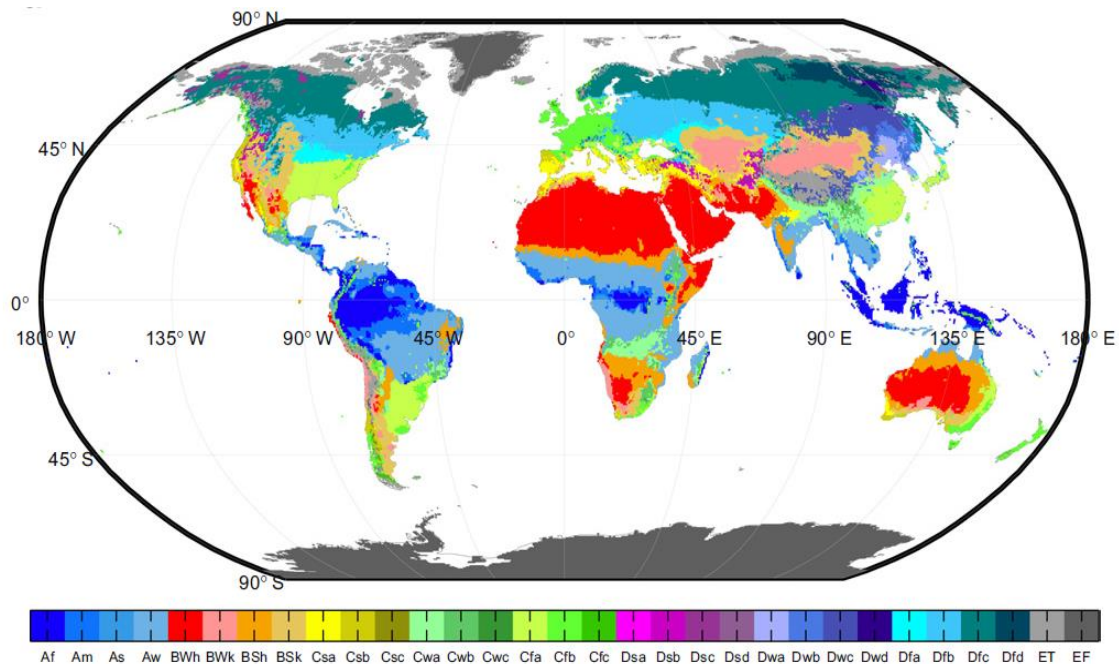


Figura 34 - Mapa da classificação climática de *Köppen-Geiger* (1961) (83).

Cada grande tipo climático é identificado por um código, constituído por letras maiúsculas e minúsculas, cuja combinação resulta nos tipos climáticos e tipos sub-climáticos, representados na Figura 34.

Deste modo, o clima é dividido com base nas características gerais de cada região, originando cinco grandes grupos ou macroclimas: Equatorial (A), Árido (B), Temperado (C), Continental ou Temperado Frio (D) e Glaciar (E) (81) (84).

De referir ainda que esta classificação é a utilizada para os ficheiros climáticos disponíveis no *software* usado neste trabalho.

Para um maior sucesso do produto módulo habitacional num mercado, é necessário fazer um estudo não só ao nível do clima, mas também em termos de interesse económico e da densidade populacional. Por isso, zonas com a existência de pouca ou nenhuma população e cujos climas são considerados extremos não foram considerados (85).

Nesta metodologia, a densidade populacional é dividida segundo a quantidade de climas existentes para cada país, sendo atribuído um peso igual a cada um. A ter em atenção que esta metodologia apresenta uma fraqueza, devido à falta de informação acerca da percentagem que representa cada clima em cada país e/ou a população associada a cada clima (85). Com base nesta metodologia foi obtida uma tabela de classificação.

Tabela 2 – Classificação do clima e sua população total, país representante e respetivo PIB *per capita*. Adaptado com base em (85).

	%	Classificação do Clima	População Total 2014 (86)	País/Cidade representante	PIB <i>per capita</i> 2014 (€)
1	9,82	BSh	14.548.171,0	Senegal/ Dakar	960,8
2	9,60	Aw	8.260.749,0	Honduras/ Tegucigalpa	2.105,4
3	8,11	BSk	78.470.222,0	Irão/ Teerão	4.748,7
4	7,63	Am	543.925,0	Suriname/ Zanderij	8.815,4
5	7,46	Dfb	1.313.645,0	Estónia/ Tallinn	17.692,3

Com base nesta informação, foi feito um estudo para países com clima maioritariamente BSh, Aw, BSk, Am e Dfb. Como critério de escolha dos países para o mercado para o qual será projetado o módulo habitacional teve-se em consideração o PIB *per capita*. Para alguns climas as discrepâncias relativamente ao nível económico são bastante evidentes. Como justificação para a escolha dos países representantes de cada clima fez-se a média do PIB *per capita* do grupo de países que cada clima abrange. Feita a média, escolheram-se os países cujo PIB *per capita* mais se aproximava da média calculada. Na Tabela 2 encontram-se os resultados com base na pesquisa efetuada. Conclui-se, portanto que os países

mais indicados para o estudo são o Senegal, as Honduras, o Irão, o Suriname e a Estónia.

De notar que estes apenas servirão de exemplo aquando a realização das simulações térmicas à casa modular, no entanto, não significa que o produto tenha de ser especificamente para aquele país mas para o tipo de clima em específico. A escolha do país serve apenas para estabelecer para que nível económico a casa destina-se, para mais tarde serem avaliados os custos.

3.2.1.2. Caracterização do clima

a) Clima BSh – Senegal/ Dakar

O clima semiárido quente ou BSh tende a estar localizado nos trópicos e nos subtropicais. Os verões costumam ser quentes e às vezes extremamente quentes, e os invernos são amenos.

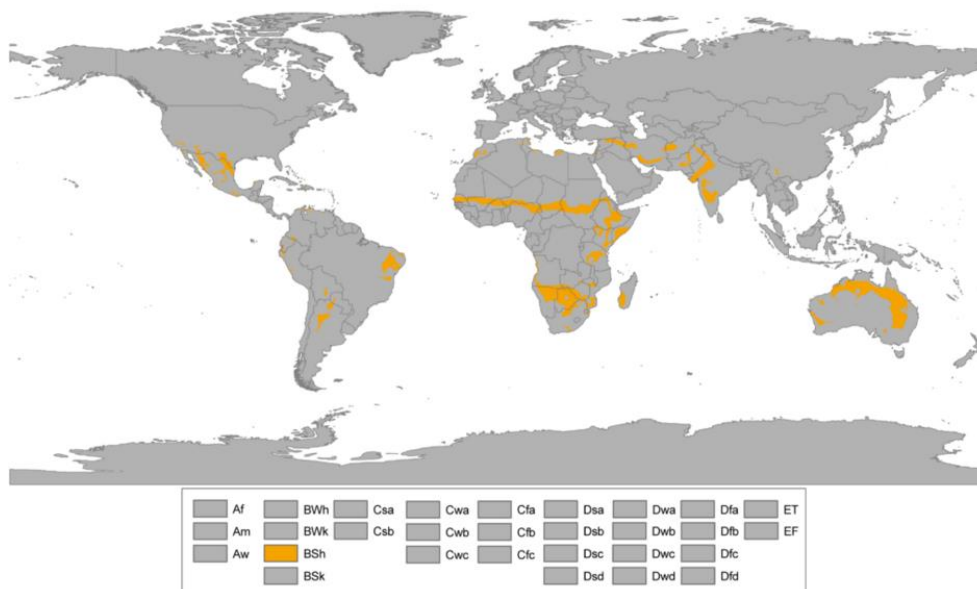


Figura 35 – Regiões com clima semiárido quente (BSh) (87).

Este clima é habitualmente encontrado em torno dos limites dos desertos subtropicais. A variante mais comum de um clima semiárido quente é encontrada em regiões como a África Ocidental, Índia, partes do México e em áreas da fronteira

com o Texas, partes do sul da Califórnia, e pequenas partes do Paquistão experimentam os efeitos sazonais das monções e têm uma curta, mas bem definida estação chuvosa (87).

Em específico no Senegal, podem-se esperar temperaturas altas durante todo o ano. No Dakar, durante a estação fria, de Dezembro a Abril, a média diária máxima é de 26°C e a média mínima é de 17°C. Na estação quente as médias mensais são de 30°C e 20°C (88). Relativamente à precipitação, a estação chuvosa do Dakar dura de Julho a Outubro, enquanto a estação seca abrange os restantes oito meses, sendo que a precipitação média anual é de 540 mm (89).

b) Clima Aw – Honduras/ Tegucigalpa

O clima de savana tropical ou Aw é caracterizado por ter uma estação seca prolongada durante o inverno. Neste tipo de clima, a temperatura não se altera muito e quando acontece é de forma muito gradual.

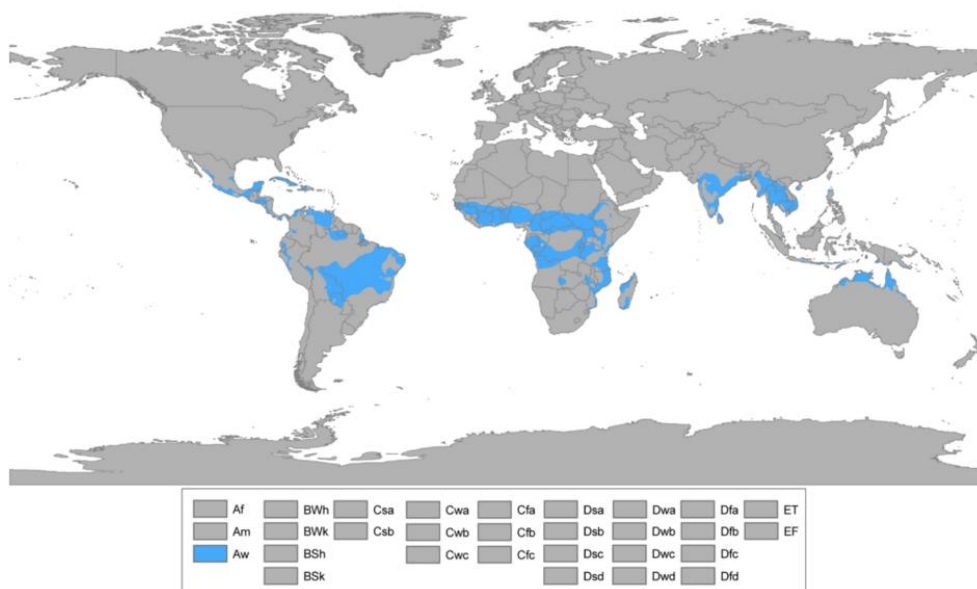


Figura 36 – Regiões com o clima de savana tropical (Aw) (90).

Este clima é habitualmente encontrado na África, Ásia, América Central, América do Sul. O clima também prevalece em seções da América Central, norte da

Austrália e sul da América do Norte, especificamente no estado da Flórida e em regiões do México (90).

Nas Honduras a estação seca vai de Novembro a Abril e a estação húmida de Maio a Outubro, sendo que as temperaturas médias anuais rondam os 32°C (91). A costa virada para as Caraíbas está sujeita chuvas fortes de Setembro a Fevereiro.

Tegucigalpa, a capital, localiza-se numa cadeia de montanhas, a uma altitude de 990 metros. O seu clima é temperado e a temperatura não varia ao longo do ano. Uma média permanece em torno de 30°C em cada mês. A principal mudança sazonal é marcada por precipitação. Os meses de Verão, de Maio a Outubro, são definitivamente os mais húmidos recebendo cerca de 152 mm por mês de chuva em Maio, Junho, Setembro, Outubro e cerca de 101 mm por mês em Julho e Agosto. A estação seca, de Novembro a Abril raramente tem mais de 25 mm de chuva por mês (92).

c) Clima BSk – Irão/ Teerão

O clima semiárido frio ou BSk apresenta geralmente verões quentes e secos (muitas vezes exceccionalmente quentes). Regiões com clima semiárido frio tendem a ter invernos frios com alguma queda de neve, embora a queda de neve seja muito mais baixa do que em locais em latitudes semelhantes com climas mais húmidos (87). Áreas que caracterizam o clima semiárido frio (BSk) tendem a ter altitudes mais elevadas do que áreas com clima semiárido quente (BSh), e estão por vezes sujeitas a grandes variações de temperatura entre o dia e a noite, às vezes até 20°C ou mais de diferença. O clima semiárido frio (BSk) em latitudes mais altas tende a ter invernos secos e verões com mais chuva, enquanto que em latitudes mais baixas tende a ter padrões de precipitação mais parecidos com climas mediterrânicos, com verões secos e invernos relativamente molhados, e ainda primaveras e outonos mais molhados (87).

Este clima é habitualmente encontrado na Ásia e na América do Norte. No entanto, também pode ser encontrado na África do Norte, África do Sul, Europa

(principalmente em Espanha), nas secções da América do Sul e em secções do interior sul da Austrália e da Nova Zelândia (87).

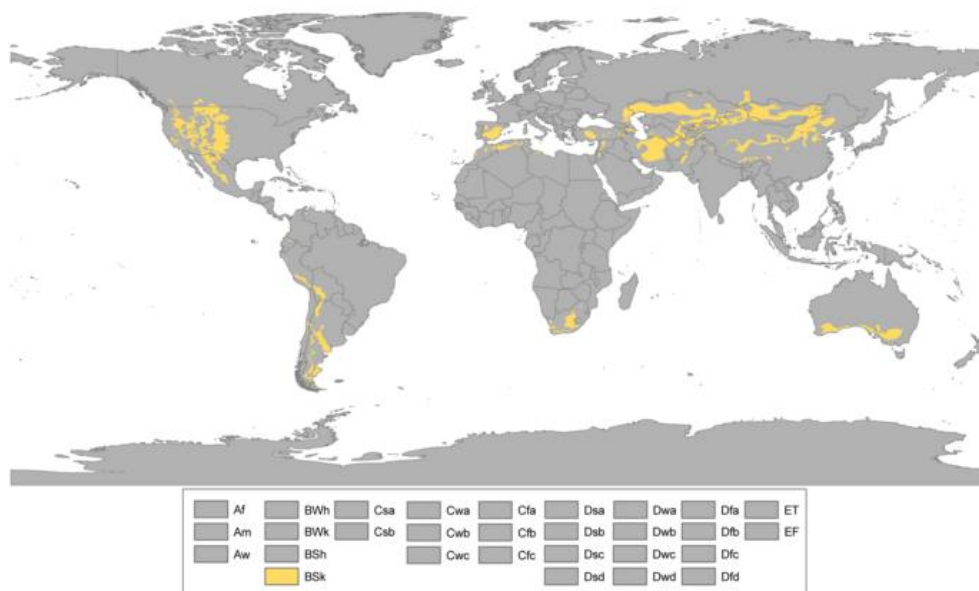


Figura 37 – Regiões com clima semiárido frio (BSk) (87).

O Irão em específico tem um clima quente e seco, caracterizado por verões longos quentes e secos e por invernos curtos e frescos. Janeiro é o mês mais frio, com temperaturas entre os 5°C e os 10°C. Em contrário, o mês de Agosto é o mais quente com temperaturas entre os 20°C e os 30°C ou mais (93).

Na maioria das áreas, os verões são quentes, com sol praticamente contínuo, mas elevada humidade sobre as áreas costeiras do sul do Golfo Pérsico. As temperaturas diárias podem ser muito quentes; em alguns dias as temperaturas podem chegar facilmente aos 40°C ou mais, especialmente ao longo do Golfo Pérsico e de Omã. Cerca de 70% da precipitação média no país ocorre entre Novembro e Março, sendo que de Junho a Agosto são meses muitas vezes sem chuva (93).

Na cidade de Teerão a temperatura média anual é de 17°C e as temperaturas médias mensais rondam os 28,3°C. A média anual de precipitação é cerca de 229,9 mm (94).

d) Clima Am – Suriname/ Zanderij

O clima de monção tropical ou Am é caracterizado por ter temperaturas médias mensais acima de 18°C em todos os meses do ano e apresenta estações secas e húmidas (95). Ao contrário do clima de savana tropical (Aw), um clima de monção tropical no mês mais seco tem menos de 60 mm de precipitação, mas mais de 100 mm no total de precipitação anual (95).

Este clima tende também a ter menos variação nas temperaturas durante o decorrer do ano do que um clima de savana tropical (Aw). Este clima tem um mês mais seco, que quase sempre ocorre no momento ou logo após o solstício de "inverno" para que lado do equador (95).

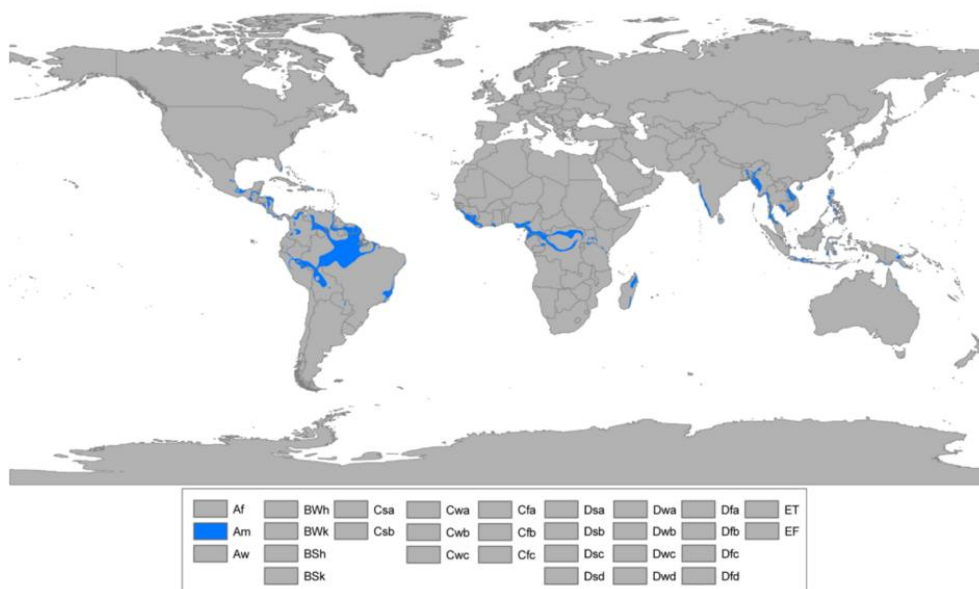


Figura 38 – Regiões com clima de monção tropical (Am) (95).

O clima de monção tropical é mais comum ser encontrado na América Central e do Sul. No entanto, existem regiões do sul e sudeste da Ásia, África (em especial da África Ocidental e Central), as Caraíbas e a América do Norte que também apresentam este clima (95).

Em específico no Suriname tem-se que este tem um clima tropical, onde a estação chuvosa é curta e dura entre Dezembro e Janeiro. Há também um longo período de chuvas, que ocorre de Abril a Julho. Ao longo do ano a temperatura média diária varia entre os 21°C e os 32°C (96).

e) Clima Dfb – Estónia/ Tallinn

O clima continental de verão quente ou Dfb é uma subdivisão dos climas continentais cuja particularidade é a ocorrência de chuvas no verão ou ao longo de todo o ano. A temperatura média do ar no mês mais frio é inferior a -3°C e no mês mais quente é superior a 10°C (97). Nenhum mês tem uma temperatura média acima dos 22°C e a precipitação é distribuída igualmente ao longo de todo o ano, sendo que os períodos de geada duram tipicamente entre 3 a 5 meses (97).

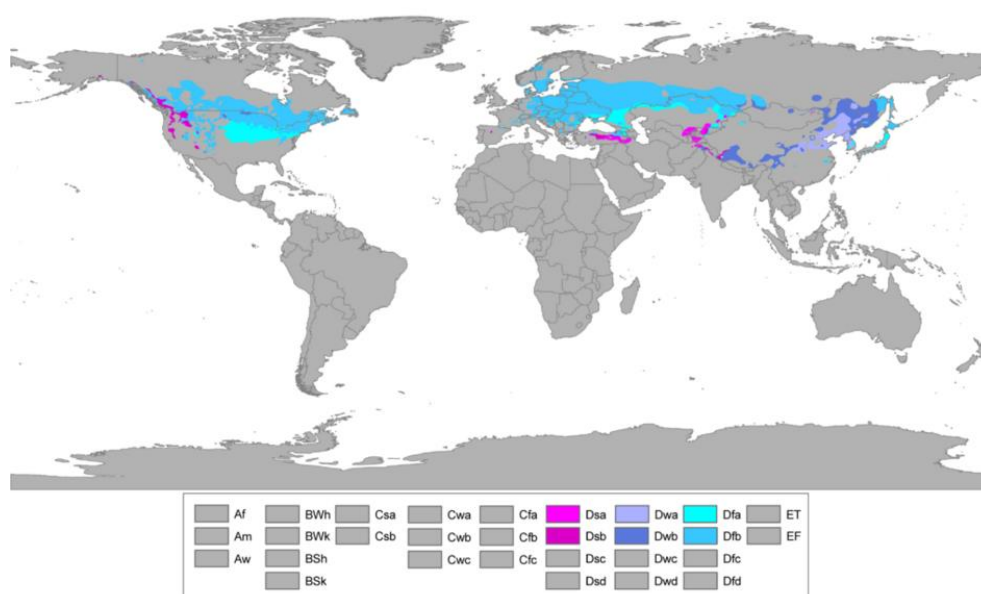


Figura 39 – Regiões com clima continental e suas variantes (98).

Esta variante em específico pode ser encontrada em lugares como Nova Inglaterra e em torno dos grandes lagos nos Estados Unidos, Canadá sul-central e sudeste, sudeste da Escandinávia, Europa Oriental, Ásia centro-oeste e nordeste da China (97).

Nomeadamente na Estónia, Janeiro é o mês mais frio com temperaturas diurnas geralmente em torno dos -5°C , mas em alguns casos os meses de inverno podem ser bastante frios com temperaturas muito abaixo de zero, cerca de -20°C ou inferior, existindo queda de neve. O clima é frequentemente ventoso e húmido devido à proximidade do mar Báltico. No Verão, as temperaturas diurnas atingem valores entre os 20 e os 25°C , mas por vezes são muito superiores a 30°C ou mais. Julho é o mês mais quente, com uma temperatura média de 18°C (99). A

precipitação anual é de cerca de 400-600 mm. Entre Maio e Setembro os dias são quentes e as noites são frescas, embora chove mais na primavera do que no verão. Outono e Inverno são geralmente um pouco frios e húmidos, por vezes com neve e muitas vezes nebuloso (99).

A localização costeira da capital Tallinn tem influência nos invernos que são mais suaves do que em outras cidades que se encontram na mesma latitude. Fevereiro é o mês mais frio do ano, com uma temperatura média de -4°C . Em Janeiro e Dezembro as temperaturas são um pouco mais altas, com temperaturas médias em torno dos 0°C (100). A primavera e o outono são amenos com chuva, no entanto, Março e Novembro, ambos experimentam temperaturas em torno do ponto de congelamento perto de inverno. As temperaturas médias no verão encontram-se entre os 19°C e os 21°C durante o dia embora durante a noite possam descer e variar entre os 9°C e os 12°C (100).

3.2.2. A tipologia do módulo habitacional

3.2.2.1. Dimensões habitacionais mínimas

De modo a auxiliar na idealização das dimensões dos diversos compartimentos do módulo habitacional é necessário ter em conta alguns requisitos legais, estabelecidos pelo Regulamento Geral das Edificações Urbanas (RGEU). Este documento, apesar de ser antigo e de se encontrar de certa forma desatualizado com a construção atual, ainda é o documento que rege e estabelece as regras para as edificações urbanas.

No capítulo III do regulamento, encontram-se estipuladas as disposições interiores das edificações e dos espaços livres. Nomeadamente no Artigo 65.º, estabelece-se que a altura mínima, piso a piso, em edificações destinadas à habitação é de 2,70 m e por sua vez o pé-direito livre mínimo não pode ser inferior a 2,40 m.

Tabela 3 - Áreas mínimas dos compartimentos segundo o Artigo 66.º do RGEU.

	Número de compartimentos e tipo de fogo							
	2	2	3	5	6	7	8	Mais de 8
	T ₀	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆	T _x > 6
	Áreas em metros quadrados							
Quarto de casal	-	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5
Quarto duplo	-	-	9	9	9	9	9	Restantes quartos 9 m ²
Quarto duplo	-	-	-	9	9	9	9	
Quarto duplo	-	-	-	-	-	9	9	
Quarto simples	-	-	-	-	6,5	6,5	6,5	6,5
Quarto simples	-	-	-	-	-	-	6,5	6,5
Sala	10	10	12	12	12	16	16	16
Cozinha	6	6	6	6	6	6	6	6
Suplemento de área obrigatório	6	4	6	8	8	8	10	(nºquartos+4) m ²

De acordo com o Artigo 66.º Regulamento Geral das Edificações Urbanas (RGEU) os compartimentos de habitação não poderão ser em número e área inferiores aos indicados na Tabela 3.

A ter em atenção que no número de compartimentos acima referidos não se incluem vestíbulos, instalações sanitárias, arrumos e outros compartimentos de função semelhante.

Relativamente ao suplemento de área obrigatório este não pode dar origem a um espaço autónomo e encerrado, deve distribuir-se pela cozinha e pela sala, e terá uma parcela afetada ao tratamento de roupa, na proporção que estiver mais de acordo com os objetivos da solução do projecto. Apenas se o tratamento de roupa for efetuado num espaço delimitado para o efeito, a área suplementar a manter desce para os 2 m².

Tabela 4 – Área bruta mínima dos fogos de acordo com o Artigo 67.º do RGEU.

Área bruta em metros quadrados	Tipo de fogo							
	T ₀	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆	T _x > 6
	35	52	72	91	105	122	134	1,6 x Ah

Por tipo de fogo entende-se como sendo definido pelo número de quartos de dormir, e para a sua identificação utiliza-se o símbolo Tx, em que x representa o número

de quartos de dormir. No Artigo 67.º é feito um esclarecimento relativamente às áreas brutas dos fogos que terão de ter os seguintes valores mínimos como mostrado na Tabela 4.

Como área bruta considera-se como sendo a superfície total do fogo, medida pelo perímetro exterior das paredes exteriores e eixos das paredes separadoras dos fogos, e inclui também varandas privativas, locais acessórios e a quota-parte que lhe corresponda nas circulações comuns do edifício. Quanto à área habitável (Ah) tem-se que esta é a soma das áreas dos compartimentos da habitação, com exceção de vestíbulos, circulações interiores, instalações sanitárias, arrumos e outros compartimentos com função semelhante e que se mede pelo perímetro interior das paredes que limitam o fogo, descontando encaixos até 30 cm, paredes interiores, divisórias e condutas.

No Artigo 68.º do RGEU estabelecem-se as áreas mínimas das instalações sanitárias conforme o fogo. Tem-se então que nas habitações T₀, T₁ e T₂, a área mínima para instalações sanitárias é de 3,5 m² e nas habitações T₃ e T₄, a área mínima é de 4,5 m², subdividida em dois espaços com acesso independente.

Para tipologias iguais ou superiores a T₅, a área mínima para instalações sanitárias é de 6 m², desdobrada em dois espaços com acesso independente.

Segundo o Artigo 69.º do RGEU, as dimensões mínimas a verificar nos compartimentos devem respeitar as seguintes exigências:

- Caso a área seja inferior que 9,5 m², a dimensão mínima será 2,10 m;
- Caso a área seja superior ou igual a 9,5m² e inferior a 12 m², deverá ser possível inscrever nesta um círculo de diâmetro não inferior a 2,40 m;
- Caso a área seja igual ou superior a 12 m² e inferior a 15 m², deverá ser possível inscrever nesta um círculo de diâmetro não inferior a 2,70 m;
- Caso a área seja igual ou superior a 15 m², o comprimento não poderá exceder o dobro da largura, exceto se for possível inscrever um círculo de diâmetro não inferior a 2,70 m.

Relativamente à largura de possíveis corredores no módulo habitacional, o Artigo 70.º estipula que estes não devem ter larguras inferiores a 1,10 m e que no caso de corredores secundários com comprimento igual ou inferior a 1,50 m, poderá ser autorizado uma largura mínima de 0,90 m.

3.2.3. Transporte e logística

3.2.3.1. Normalização

O Decreto-Lei n.º 203/2007 de 28 de Maio é o documento que regulamenta os pesos e as dimensões máximas autorizadas para veículos em circulação.

Segue a apresentação das respetivas dimensões e pesos para o conjunto de veículo motor-reboque e semi-reboque constantes na Lei. Uma vez que a regulamentação prevê apenas dimensões e pesos do conjunto global do veículo, procedeu-se a uma verificação das dimensões e peso da generalidade dos reboques e semi-reboques de modo a conhecer, de fato as dimensões destes.

Assim sendo, no que diz respeito às dimensões máximas dos veículos temos a seguinte legislação (Artigo 3.º do Decreto-Lei n.º 99/2005 (Secção II) de 21 de Junho), na qual tem-se:

- Comprimento máximo:

“a) Veículos a motor de dois ou mais eixos (com exceção dos automóveis pesados de passageiros): 12 m;”

“b) Reboques de um ou mais eixos: 12 m;”

“f) Conjunto veículo trator-semi-reboque de três ou mais eixos: 16,5 m;”

“g) Conjunto veículo a motor-reboque: 18,75 m;”

- Largura máxima dos veículos:

“a) Qualquer veículo: 2,55 m;”

“b) Veículos de transporte condicionado: 2,6 m;”

- Altura máxima:

“A altura máxima para qualquer veículo é de 4 m.”

Foi publicado em Diário da República o Decreto-Lei n.º 203/2007, que altera o regulamento que fixa os pesos e as dimensões máximos autorizados para os veículos em circulação, aprovado pelo Decreto-Lei n.º 99/2005, de 21 de Junho.

No Artigo 8.º deste decreto referente ao peso bruto máximo dos veículos tem-se:

- Peso bruto máximo:
 - “a) Dois eixos: 19 t;”
 - “b) Três eixos: 26 t;”
 - “c) Quatro ou mais eixos: 32 t.”

- Peso bruto máximo para reboques:
 - “a) Um eixo: 10 t;
 - “b) Dois eixos: 18 t;”
 - “c) Três ou mais eixos: 24 t.”

Relativamente ao peso bruto rebocável, de grande pertinência para este trabalho, tem-se o Artigo 10.º do Decreto-Lei n.º 203/2007.

- Nos conjuntos formados por um veículo a motor e um reboque ou semi-reboque, o peso bruto máximo do reboque ou do semi-reboque pode ser um dos seguintes valores:
 - “a) O constante no documento de identificação do reboque, se esse valor for menor ou igual ao peso bruto rebocável constante no documento de identificação do veículo trator;”
 - “b) O valor do peso bruto rebocável do veículo trator, se o peso bruto constante no documento de identificação do reboque exceder aquele valor.”

3.2.3.2. Dimensões e peso dos meios de transporte

Para o estudo foi tido como exemplo os reboques e semi-reboques da empresa Mergul, sediada na Figueira da Foz. Esta empresa é vocacionada para a construção de veículos específicos ou destinados a aplicações muito particulares.

Tabela 5 – Dimensões e peso dos possíveis veículos a utilizar no transporte dos painéis para o módulo habitacional.

Tipo de veículo	Largura (mm)	Comprimento (mm)	Peso Bruto (toneladas)	Carga máxima (toneladas)	Fotografia
Reboque de carga geral	2550	6000	14	9,3	 <p>Figura 40 – Reboque de carga geral da Mergul (101).</p>
Reboque porta máquinas 2/3 eixos	2500	Comprimento útil da carroçaria: 7500	21 Tara (aprox.): 5,0	16,0	 <p>Figura 41 - Reboque porta máquinas 2/3 eixos da Mergul (102).</p>
Semi-reboque de carga geral	2480	Comprimento útil da carroçaria: 13600	33,5 Tara (aprox.): 6,2	27,3	 <p>Figura 42 - Semi-reboque de carga geral da Mergul (103).</p>
Semi-reboque porta máquinas	2480	Comprimento útil da carroçaria: 3600+8400	33,5 Tara (aprox.): 7,2	26,3	 <p>Figura 43 - Semi-reboque porta máquinas (104).</p>

Na Tabela 5 encontram-se as diferentes categorias dos reboques e semi-reboques e respetivas dimensões e capacidade de carga associadas. Com base nesta tabela e juntamente com as informações contidas no Decreto-Lei n.º 203/2007 foi feito o estudo para as dimensões dos painéis constituintes do módulo habitacional e o valor máximo de painéis a transportar por veículo. Por peso Bruto entende-se que seja o peso do reboque ou do semi-reboque somado com o peso máximo da carga possível de ser transportada.

3.2.3.3. Dimensões do contentor

O termo contentor define um equipamento utilizado para transporte de carga em navios, comboios e camiões. Geralmente de grandes dimensões, estes podem ser fabricados em metal ou em madeira, podendo ser reciclados.

Estes são dotados de dispositivos de segurança previstos por legislações nacionais e por convenções internacionais. Têm como característica principal constituir hoje em dia unidades de carga independentes, com dimensões padrão em medidas inglesas (pés). A unidade base geralmente considerada é o *TEU* (em *inglês*: *twenty feet equivalent unit*) (105).

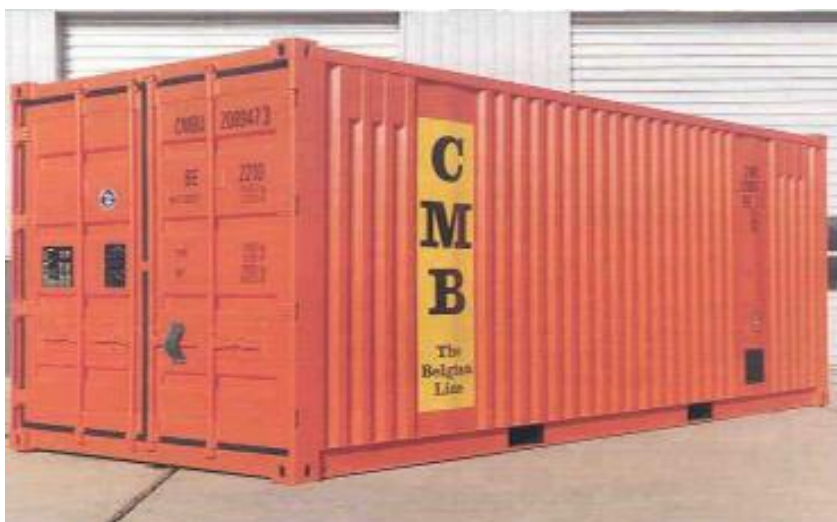


Figura 44 – Exemplo de contentor (105).

Tabela 6 - Tabela adaptada de (105) com as características dimensionais de contentores de carga seca.

Tipo de contentor	Tara (kg)	Volume interno (m ³)	Comprimento interno (mm)	Largura interna (mm)	Altura interna (mm)	Largura da porta (mm)	Altura da porta (mm)	Carga (kg)
6058 mm	2250	33,2	5895	2350	2392	2340	2292	28230
12192 mm	3780	67,7	12024	2350	2392	2340	2292	26700
High Cube de 12192 mm	4020	76,3	12024	2350	2697	2340	2597	26460
High Cube de 13716 mm	4950	88,4	13532	2414	2694	2374	2585	29050

Na Tabela 6 é possível observar as diferentes dimensões, peso e carga de quatro contentores marítimos de carga seca de dimensões diferentes. As dimensões são padronizadas existindo pequenas diferenças de empresa para empresa.

Tendo-se mais esta informação como base para o estudo, procedeu-se então ao estudo do dimensionamento dos painéis.

3.3. Estudo do dimensionamento dos painéis

A metodologia efetuada consistiu em ter em conta os pontos mencionados anteriormente como as dimensões habitacionais mínimas, mas principalmente as dimensões dos reboques e semi-reboques e a dimensão de quatro tamanhos diferentes de contentores marítimos de carga seca.

Tabela 7 - Dimensões máximas dos painéis.

	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)	Área (m²)	Volume (m³)
Parede Externa	2400	2000	80	4,8	0,38
Parede Interna	2400	1000	80	2,4	0,19
Pavimento	2000	2000	100	4,0	0,40
	2000	2300		4,6	0,46
	2300	2300		5,3	0,53
Cobertura	2000	2000	150	4,0	0,60
	2000	2300		4,6	0,69
	2300	2300		5,3	0,80

A partir daqui, começou-se por constatar que tanto nos reboques e semi-reboques como nos contentores marítimos, é mais comum para painéis de dimensões 2400x2000 ou de 2000x2000, ser possível dispor dois painéis no plano e que o número de painéis a serem transportados teria de ser sempre par, também para que fosse possível construir um módulo habitacional com o formato de um quadrado ou de um retângulo.

Como espessuras iniciais optou-se por atribuir tanto às paredes exteriores como às interiores 80 mm, ao pavimento 100 mm e à cobertura 150 mm.

Sendo assim, na Tabela 7, têm-se as dimensões de partida para o estudo seguinte relativo ao comportamento térmico e de habitabilidade, do qual, fatores como a

espessura serão afinados de acordo com a maior ou menor necessidade de isolamento, o que irá afetar, por exemplo, a área bruta e consequentemente a tipologia possível de ser transportada nos diferentes contentores.

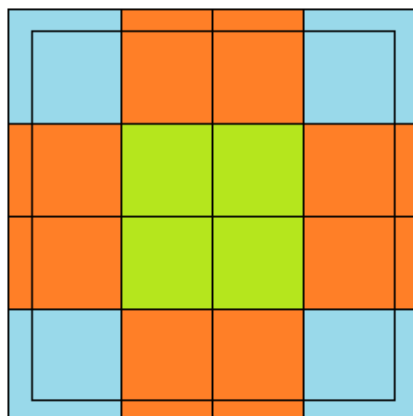


Figura 45 – Esquema exemplo da vista de cima para um módulo de 8x8 m.

Para o pavimento e para a cobertura serão necessários três tipos de painéis com a mesma espessura mas com dimensões diferentes, como explicado no exemplo da Figura 45. Painéis com 2000x2000 (a verde) são painéis que se encontram centralizados, enquanto que os painéis com 2000x2300 (a laranja) são painéis para as extremidades da cobertura e do pavimento e por fim, os de 2300x2300 (a azul) são os que formam os cantos.

Volume Percentual dos Elementos Construtivos

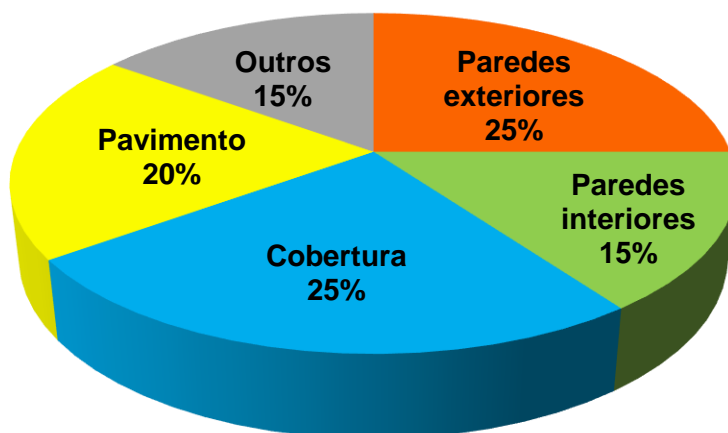


Figura 46 – Volume percentual dos elementos construtivos distribuídos no contentor de carga marítimo.

Uma vez que um dos objetivos posteriormente impostos é que a casa caiba num contentor de carga marítimo, estipulou-se desde partida o volume percentual que cada elemento construtivo teria de ocupar no mesmo. Estipulando-se as espessuras dos elementos, chegou-se ao valor do volume percentual total ocupado sem contar com os Outros elementos construtivos. Na Figura 46 tem-se então que os painéis das paredes exteriores apenas poderão ocupar cerca de 25% do contentor, os painéis das paredes interiores cerca de 15%, os da cobertura cerca de 25%, os do pavimento cerca de 20% e 15% de Outros elementos construtivos como portas, janelas, sistemas de sombreamento, entre outros.

No Anexo I encontram-se anexadas as tabelas elaboradas para o estudo relativo ao número de painéis possíveis de serem armazenados nos diferentes contentores tendo em conta o volume percentual a ocupar pelos elementos e a área útil do módulo habitacional de acordo com o número de painéis possíveis de serem alojados.

3.4. Resumo e conclusões do capítulo

De acordo com o critério do clima concluiu-se que existem cinco climas para os quais seria interessante estudar o desempenho higró-térmico da casa modular. Em concreto, os climas BSh, Aw, BSk, Am e Dfb. Após feita a média do PIB *per capita* do grupo de países de cada clima, chegou-se à conclusão de que os países que melhor representariam estes climas seriam o Senegal, as Honduras, o Irão, o Suriname e a Estónia, respetivamente.

Tabela 8 – Áreas e tipologias possíveis para os módulos de modo a cumprir com os requisitos e constrangimentos.

	T0	T1	T2	T3	T4	T5	T6
Área bruta dos fogos	38	50	75	99	124	124	148
Área bruta mínima dos fogos	35	52	72	91	105	122	134
Área interior	36	48	72	96	120	120	144
Área interior mínima	22	31	44	54,5	61	74	82,5

Tabela 9 – Quadro de resumo das tipologias habitacionais possíveis para cada tipo de contentor.

	Tipologia possível	Área mínima do módulo (m ²)	Área máxima do módulo (m ²)
6096 mm	T ₀ , T ₁ e T ₂		72
12192 mm			
High Cube de 12192 mm	T ₀ , T ₁ , T ₂ , T ₃ , T ₄ , T ₅ e T ₆	36	144
High Cube de 13716 mm			

O estudo relativo às dimensões mínimas estipuladas pelo RGEU e o estudo relativo tipo de transporte e logística foram essenciais para se chegar às possíveis dimensões dos painéis, do número de painéis possíveis de serem transportados e consequente as dimensões da casa modular. Na Tabela 9, encontra-se a o resumo e a conclusão relativamente à correlação existente entre o tipo de contentor e a tipologia possível de modo a cumprir com os constrangimentos pré-definidos. No Anexo I é possível encontrar algumas tabelas onde são justificados os valores tanto da Tabela 8 como da Tabela 9.

.

4. Especificação do produto

4.1. Sumário

Neste capítulo é abordada a temática do desenvolvimento do produto, neste caso aplicado ao desenvolvimento de uma casa modular unifamiliar.

São determinadas e qualificadas as necessidades funcionais, estéticas, conforto, eficiência energética e regulamentares durante o processo de desenvolvimento do projeto.

Para tal é utilizado a ferramenta Matriz da Qualidade a qual, atribuindo-se prioridades perante os requisitos do consumidor e os parâmetros de *design*, são retiradas as características que irão trazer mais valor ao produto. É também aplicado o conceito do Esquema do Design do Produto que serve de simplificação do método anterior e onde é esquematizado o problema em questão.

4.2. Desenvolvimento do Produto

O desenvolvimento do produto é definido como sendo “a criação de produtos com características novas ou diferentes, que oferecem benefícios novos ou adicionais para o cliente. O desenvolvimento do produto pode envolver a modificação de um produto existente ou a sua apresentação, ou formulação de um produto inteiramente novo que satisfaça quer um cliente recém-definido ou um nicho de mercado” (106). O ímpeto para o desenvolvimento de um novo produto resulta, entre outros, da perceção de uma oportunidade de mercado (*market-pull products*) ou do desenvolvimento de uma nova tecnologia (*technology-push products*).

O processo de desenvolvimento em si é uma sequência de etapas ou atividades que a empresa emprega para conceber, projetar e comercializar um produto, existindo muitas formas de se classificar as fases e atividades do processo.

A compreensão clara de um problema de desenvolvimento do produto é essencial para a concepção de um produto eficaz. Esse entendimento é refletido num conjunto bem determinado de requisitos.

As decisões tomadas nas primeiras fases de concepção do produto são as mais importantes, mas ocorrem com a menor quantidade de informação quantitativa "sólida". Para ajudar a compensar isso, é importante garantir que sejam descobertos os requisitos, que estes sejam representados e que exista uma profunda compreensão das relações entre estes de modo a que estimule a criação de produtos eficazes, assim como o estabelecimento de modelos racionais e cognitivos do produto na mente de quem desenvolve o produto (107).

A fase inicial do desenvolvimento do produto passa pelo desenvolvimento concetual, sendo este determinante para assegurar um bom resultado do processo de desenvolvimento, uma vez que é durante esta fase que são identificadas as necessidades do mercado alvo, analisados os produtos da concorrência, definidas as especificações do produto, é feita a seleção de um conceito, que se faz a análise económica e que se estabelecem as linhas de orientação gerais do projeto. Nesta fase alicerça-se todo o trabalho de desenvolvimento condicionando o seu resultado final.

Numa segunda fase é feito o desenvolvimento de sistemas, ou seja, é definida a arquitetura do produto, a decomposição do produto em componentes e subsistemas, é definida a montagem final do sistema, definidas as especificações funcionais de cada componente e definido o diagrama preliminar do fluxo do processo de montagem final.

A terceira fase é onde é feito o projeto de detalhe. Esta passa pela definição completa das especificações geométricas, dimensionais e tolerâncias, assim como os requisitos de materiais de cada um dos componentes que constituem o produto. São também feitas as identificações de todos os componentes normalizados e respetivos fornecedores; é elaborado o plano de fabrico que permita definir e projetar as ferramentas necessárias para produzir os componentes específicos do produto, assim como, a documentação técnica do produto, nomeadamente desenhos de definição e ficheiros de arquivo relativos às fases de desenvolvimento do produto, e ainda, a documentação técnica de fabrico,

nomeadamente projeto das ferramentas de fabrico, montagem e controlo e respetivos ficheiros de arquivo das fases de desenvolvimento. Por fim, é elaborado o plano de fabrico e montagem do produto.

Após a fase do projeto de detalhe são realizados ensaios e melhoramentos ao produto, sendo feito o fabrico e a validação das diversas fases de pré-produção do produto.

Por fim, tem-se então o início da fabricação do produto recorrendo aos sistemas definidos anteriormente para a sua produção. O objectivo desta fase é treinar as pessoas diretamente ligadas ao fabrico do produto e eliminar os problemas que possam persistir durante as fases anteriores. Os produtos obtidos nesta fase são habitualmente colocados em clientes de referência para que estes possam identificar eventuais falhas. Esta fase serve também de transição para a fase de produção (intensiva ou em massa). O produto começa então a ser fornecido aos diversos canais de distribuição.

4.2.1. Matriz da Qualidade (QFD)

A matriz da qualidade (ou desdobramento da função qualidade) do inglês *Quality Function Deployment* (QFD) foi originalmente desenvolvida pelo Dr. Yoji Akao em 1966, no Japão, como um sistema de qualidade focado em fornecer produtos e serviços que satisfizessem o consumidor (108). Assim, de modo a fornecer produtos ou serviços inovadores, de forma eficiente aos clientes, é necessário que estes sejam ouvidos durante todo o processo de desenvolvimento do produto ou do serviço. Este método incentiva a profunda compreensão das necessidades e desejos dos clientes permitindo assim priorizar as características do produto/serviço para esses requisitos, onde começa-se por fazer uma lista com os requisitos dos clientes que em seguida são traduzidos sistematicamente em características ou medidas de *design* adequadas.

Resumidamente, o QFD ajuda a identificar os objetivos que reflitam as necessidades reais dos clientes. Identificar os objetivos do ponto de vista do cliente garante que o valor do cliente seja criado nas fases do processo de inovação que

seguem a conceptualização. Esta é uma abordagem evolutiva para a inovação de produtos/serviços, uma vez que existe a conceptualização dos produtos com base numa análise cuidadosamente do mercado, do desempenho de produtos anteriores e da perspectiva dos clientes. Este é na verdade um método para a melhoria contínua, enfatizando o impacto da inovação na aprendizagem organizacional, fazendo com que seja possível incorporar os processos de comunicação e de tomada de decisões multidisciplinares para a organização (108).

4.2.1.1. Metodologia do QFD

A metodologia do QFD passa em primeiro lugar por identificar os requisitos do consumidor, ou seja, quais as necessidades e expectativas de um utilizador tipo devem ser satisfeitas. Nesta fase os requisitos do consumidor são classificados de acordo com a sua importância relativa e agrupados por afinidades.

Posteriormente é feita a identificação dos requisitos do projeto, estes definidos como sendo as características de engenharia para avaliação e controlo do produto final, ou seja, as variáveis e/ou os atributos que vão ser utilizados para verificar e medir a qualidade do produto final. Os requisitos do projeto terão de dar resposta a como é que os requisitos do consumidor vão ser satisfeitos a nível do projeto e como vão ser verificados sobre o produto final.

Após identificados os requisitos do consumidor e os requisitos do projeto, preenche-se a matriz das relações, classificando-se o tipo de relações entre os requisitos do consumidor e os requisitos do projeto. Estas são classificadas como forte, média e fraca, de modo a identificar os requisitos do projeto com maior influência na satisfação de um determinado requisito do consumidor e a ausência e/ou inadequabilidade das relações.

Finalizado o preenchimento da matriz das relações, segue-se para a avaliação competitiva e para os argumentos de venda. Nesta fase é feita a avaliação da posição competitiva no mercado e a identificação dos pontos fortes em relação à concorrência, que podem ser considerados potenciais argumentos de venda, assim como os pontos fracos, que requerem à partida acções de melhoria. Seleciona-se

o produto concorrente mais importante e classifica-se cada um dos requisitos do cliente de 1 (pior) a 5 (melhor) para os produtos em causa.

Um dos passos é a classificação da dificuldade técnica dos requisitos do projeto, em que a classificação da dificuldade técnica tem em conta a dificuldade de execução técnica, o custo necessário para obter a especificação e a dificuldade de alterar o projeto. Esta classificação ajuda a definir os objetivos do projeto, ou seja, as especificações e as respetivas tolerâncias.

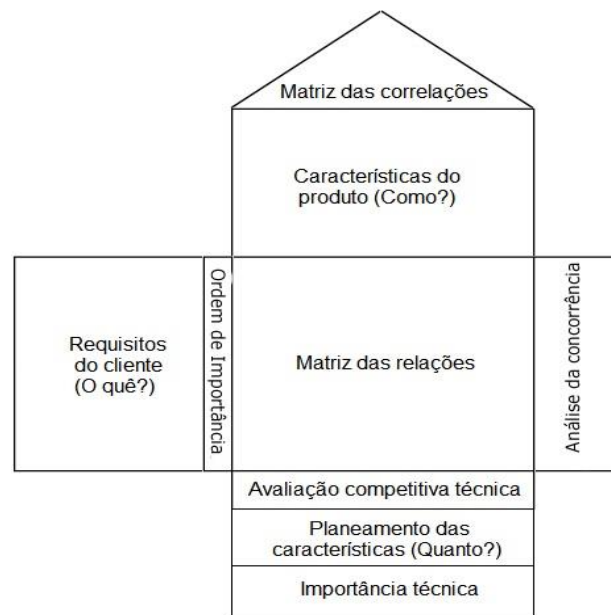


Figura 47 – Esquema da matriz da qualidade. Adaptado de (109).

A sexta etapa consiste na quantificação dos requisitos do projeto, que pode revelar alguma dificuldade, especialmente numa fase muito inicial de desenvolvimento do produto e se não existe experiência com produtos e/ou especificações similares. Se o produto já existe e está numa ação de re-engenharia e de melhoria, o projeto de engenharia é uma boa fonte de informação para este levantamento. Se o produto ainda não existe e está numa fase inicial de desenvolvimento, estas especificações devem ser entendidas como objetivos que podem sofrer ajustes. De seguida passa-se para a avaliação competitiva técnica da quantificação dos requisitos do projeto, ou seja, a comparação do produto com os produtos concorrentes, onde o objetivo é identificar áreas de sobredimensionamento, cujas características técnicas, embora, superiores à concorrência, não são apreciadas pelos consumidores (não são argumentos de venda); e áreas de

subdimensionamento, onde o posicionamento técnico é inferior à concorrência e que degeneram em perda de competitividade no mercado.

O penúltimo passo consiste no cálculo da importância técnica. Multiplica-se para cada requisito do projeto, a importância dos requisitos do consumidor, relacionados de 1 a 5 pela importância da relação (9- relação forte, 3 – relação média, 1- relação fraca). O somatório destes produtos representa a importância técnica absoluta. A relativa obtém-se em percentagem pela divisão da importância absoluta de cada requisito pela soma total.

A quantificação da importância técnica ajuda a identificar quais os requisitos do projeto que pela sua importância devem prioritariamente ser objeto de ações de melhoria. Esta quantificação não deve nunca substituir a avaliação qualitativa, mas sim constituir um meio auxiliar.

Opcionalmente, é feito o preenchimento da matriz de correlações, que contribui para a identificação de eventuais correlações entre os requisitos do projeto. A classificação positiva e negativa é decisiva para o estabelecimento de ações de melhoria, nomeadamente quando a dificuldade técnica de alterações de um requisito do projeto é elevada. Nesse caso, poderá ser possível procurar caminhos alternativos através de outros requisitos correlacionados com ele, cuja modificação determine indiretamente uma melhoria ou uma maior facilidade na execução de uma especificação de elevada dificuldade técnica.

4.2.1.2. Requisitos de clientes e especificações de produto casa modular

Numa primeira abordagem, de modo a que fosse possível determinar com mais eficácia alguns dos requisitos do cliente, recorreu-se à elaboração de um inquérito no qual participaram cerca de 50 pessoas. Com o auxílio desta ferramenta foi possível saber que requisitos as pessoas regra geral valorizam numa casa modular. Começou-se primeiro por querer saber se conheciam este tipo de construção, ao qual de acordo com os inquéritos a maioria conhece. No entanto, não têm grande opinião quando se pergunta se gostariam de viver numa casa deste género. Outra

questão introdutória era se consideravam este tipo de construção mais barata ou mais cara do que a convencional, à qual a esmagadora maioria considera que a construção modular é mais barata.

Relativamente aos requisitos em si tem-se que o que o cliente valoriza mais numa casa modular são aspetos como:

- *Design*;
- Conforto térmico;
- Preço (valor de aquisição);
- Qualidade (que neste caso será quantificada ao nível da segurança, ou seja, resistência, estabilidade e o ser inviolável);
- Rapidez de construção;
- Sustentabilidade;
- e a facilidade em alterar divisões.

Sabe-se ainda que consideram a qualidade e o custo dois fatores importantes e que o *design* nem tanto. A arquitetura diferenciada é preferível à arquitetura pré-definida e que a funcionalidade é mais importante do que a qualidade dos acabamentos.

Tendo em conta a informação recolhida passou-se à fase seguinte, que consistiu em elaborar a matriz da qualidade, com a qual, atribuindo-se pesos aos requisitos do cliente foi possível determinar quais as características prioritárias de modo a que o produto fosse de encontro com as expectativas do cliente.

4.2.1.3. Determinação e qualificação das especificações do produto

O desdobramento da função qualidade é composta pela fase de desdobramento da qualidade (matriz da qualidade) cujo objetivo é, através do clientes chegar à priorização das especificações do produto. A segunda fase consiste então no desdobramento da função qualidade em si, na qual, através da priorização obtida da matriz da qualidade chega-se às especificações do processo.

a) Matriz da Qualidade

Utilizando o método do Desdobramento da Função Qualidade ao produto casa modular unifamiliar, optou-se neste estudo por escolher a tipologia T₂ uma vez que considera-se que seja a tipologia mais comum para uma família atual. Na matriz da qualidade são identificadas as relações entre os requisitos do cliente e as especificações do produto a ter em conta. Relativamente ao *benchmarking* técnico do produto não foi possível obter algumas informações consideradas interessantes do ponto de vista comparativo e com vista a melhorar o nosso produto.

Requisitos do Consumidor		Nº assinaladas		Área útil	Área de implantação	Altura de piso	Porcentagem de envidraçados	Isolamento sonoro	Isolamento térmico - Coeficiente de transferência de calor (U)	Espessura do isolamento	Acabamentos	Configuração do sistema A/V/C	Tipo de estrutura	Resistência do material de estrutura	Resistência do material de revestimento	Nº de elementos	Tempo de fabrico/construção	Tempo de montagem	Preço	Peso (Prontades)										Peso relativo									
Arquitetural/ Design	Tipologia	9	3						1											9	5	1	2	2	5	5	5	10,1,5	8	3									
	Disposição interior	3																			4	1	1	1	4	4	5	1,0	1	4	2								
	Esteticamente apelativa	1	3	9	9	9					9					1				9	6	1	4	3	5	5	3	1,1	1	6	3								
	Espaços interiores	9	9	3	9	9			1												3	1	3	3	4	5	4	1,1	1	3	1								
	Luminosidade						9														7	1	4	4	5	4	1,1	1	7	3									
	Têrminicamente confortável		1	1	9	9	9	9	9	9	9	1	9							3	17	1	4	4	3	4	5	1,0	1,5	27	11	7							
Funcionalidade técnica	Confortável a nível sonoro							9	3											3	2	1	3	3	3	3	1	1,2	1	2	1	1							
	Impermeável									3	3										8	1	5	5	3	3	5	1,0	1,5	19	8	4							
	Sustentável									3	3	1	3							3	12	1	5	3	3	3	3	1,1	1,2	19	8	4							
	Durável									1	1									1	14	1	3	3	3	3	3	1,1	1,5	22	10	4							
Segurança	Resistente																				13	1	4	4	4	4	4	1,1	1,5	20	9	9							
	Estável	9					9						9								9	1	3	3	3	3	3	1,1	1	10	4	1							
Logística	Inviável						3						9	9								9	1	3	3	3	3	1,1	1	10	4	1							
	Fácil de construir/montar											1		9			9	9			16	1	4	4	2	2	5	1,0	1,5	25	11	1							
Custo	Fácil de transportar												9				9	9		3	18	1	3	3	3	3	5	1,0	1,5	28	12	1							
	Custo manutenção						9					3	3	1						1	10	1	4	4	2	3	4	1,1	1	11	4	1							
	Valor de aquisição	9	9	9	9			3	1	9	3	9	9	9	1	1	9	9	9	9	11	1	5	3	2	4	4	1,1	1,2	14	6	1							
	Peso absoluto	104	140	131	67	48	304	15	187	163	122	188	488	203	166	260	149	161	218	3115											234	100							
	Peso relativo	3	5	4	2	2	10	0	6	5	4	6	16	7	5	8	5	5	7	100																			
	Unidades	un	m²	m²	m	%	dB	Wm/K	m	Pa	Pa	un	Dias	Dias	€																				
	Nosso Produto	4	1	72	75	2,4	<50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	5	<50.000																				
	Archi + Carbon Positive House	3	1	76	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	234.295																			
Benchmarking Técnico de Produto	Paradigm House	5	1	122	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	561.407																				
	Q-House	>6	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-																				
	Stillwater dwellings	>6	2	139	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	423.968																				
	Dificuldade de atuação	4	1	3	3	5	2	1	4	3	4	3	4	3	3	4	4	4	4																				
	Importância das características corrigida	414	140	228	117	108	430	15	374	282	243	325	976	351	288	520	269	323	436																				

Figura 48 – Matriz da Qualidade para a casa modular unifamiliar de tipologia T.2.

Fazendo uma análise crítica à matriz da qualidade, verifica-se que não existem linhas em branco, o que significa que foram identificadas características do produto relacionadas com os requisitos do cliente, sendo satisfeitas as necessidades do cliente. O mesmo se pode observar quanto à não existência de colunas em branco, o que significa que as características do produto encontram-se todas relacionadas de alguma forma com alguns dos requisitos do cliente.

Pode-se também observar que não existem linhas só com relações fracas o que significa que existem as condições necessárias para a qualidade ser encontrada.

Relativamente à existência de relações fracas por coluna estas não são muito significantes em termos de quantidade, concluindo-se que as características do produto a desenvolver encontram-se bem clarificadas.

Analisando a avaliação da concorrência, verifica-se que os pontos onde todos os produtos concorrentes são mais fracos são no que diz respeito à disposição interior, ao serem termicamente confortáveis, fáceis de construir/montar e fáceis de transportar, possibilitando ao nosso produto uma posição de destaque.

Como metas ou valores alvo tem-se que:

- O número de assoalhadas seja 4;
- O piso seja apenas 1;
- A área útil seja de 72 m² para um T₂;
- A área de implantação seja de 75 m²;
- A altura do piso seja de 2,40 m;
- A percentagem de envidraçados seja inferior a 50%;
- Tempo de fabrico/construção máximo de 5 dias;
- Tempo de montagem máximo de 5 dias;
- Preço final inferior a 50.000 €.

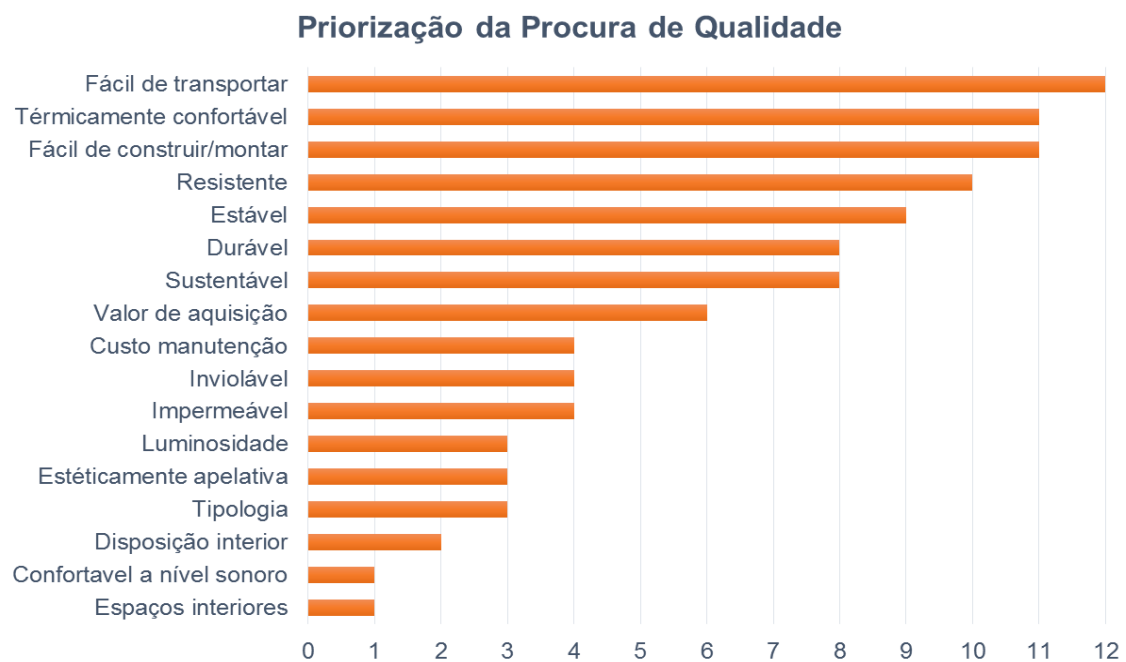


Figura 49 – Priorização da procura da qualidade.

A Figura 49 mostra o gráfico da priorização da procura da qualidade atribuída inicialmente pelo cliente.



Figura 50 – Priorização revista para os requisitos do cliente (peso absoluto).

Na Figura 50, é possível observar o gráfico da priorização revista para os requisitos do cliente no qual observa-se quais os requisitos do cliente que deverão ser mais tidos em consideração ao longo do processo de desenvolvimento do projeto são, principalmente, que a casa seja fácil de ser transportada e construída/montada, que seja termicamente confortável, resistente, estável, durável e sustentável. O contrário é dito para aspetos como os espaços interiores, a disposição interior e confortável a nível sonoro.



Figura 51 – Priorização das especificações do produto.

O gráfico da priorização das especificações do produto, Figura 51, mostra que ao longo do processo de desenvolvimento do produto que aspetos como o tipo de estrutura adotada, a percentagem de envidraçados, o número de elementos construtivos, o preço, a resistência do material da estrutura, o isolamento térmico e a configuração do sistema AVAC devem ser mais tidos em consideração de modo a cumprir com os requisitos do cliente.

b) Matriz do Produto

A matriz do produto apresentada na Figura 52 apresenta os elementos construtivos da casa modular como detalhes do produto e as especificações do produto como características finais deste. No resultado desta matriz é tido em conta a priorização das especificações do produto obtidas através da matriz da qualidade e a intensidade das relações existentes entre estas e os detalhes do produto. São tidos em conta também aspetos como a dificuldade de desenvolvimento de determinado detalhe do produto e o tempo de desenvolvimento deste.

Requisitos do Consumidor		Nº assinalhadas		Nº pisos		Área útil		Área de implantação		Altura de piso		Porcentagem de envidraçados		Isolamento sonoro		Isolamento térmico - Coeficiente de transferência de calor (U)		Espessura do isolamento		Acabamentos		Configuração do sistema AVAC		Tipo de estrutura		Resistência do material de estrutura		Resistência do material de revestimento		Nº de elementos		Tempo de fabrico/constituição		Tempo de montagem		Prego		Importância das partes		Dificuldade de desenvolvimento		Tempo de desenvolvimento		Priorização revista		Priorização revista																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
																																						3	5	4	2	2	10	0	6	5	4	6	16	7	5	8	5	7	1	125	1	1	125	3																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
Estrutura da Fundação	Importância das características corrigida	3	5	4	2	2	10	0	6	5	4	6	16	7	5	8	5	7																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						</

Figura 52 – Matriz do Produto para os diversos elementos da casa modular unifamiliar.

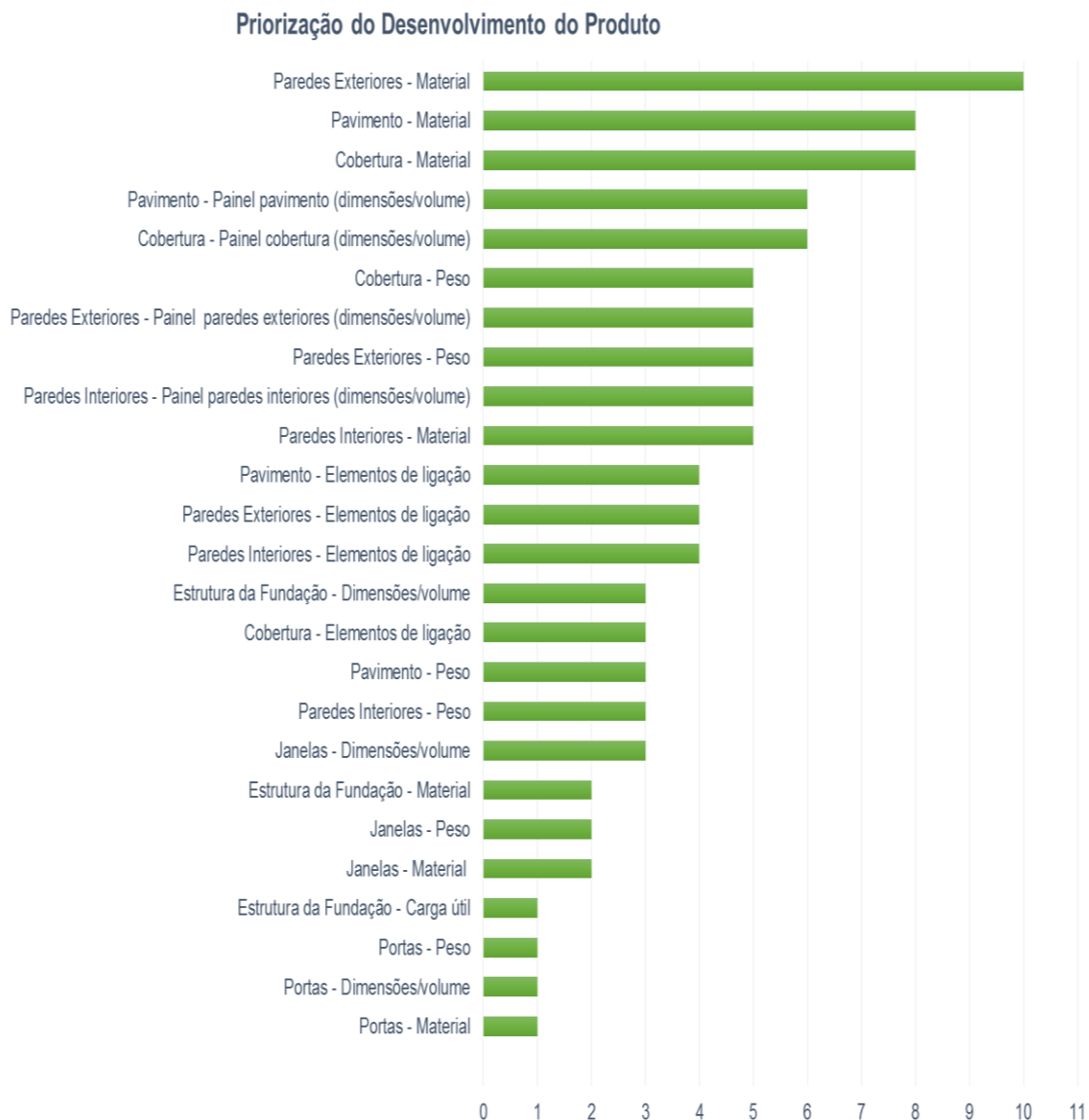


Figura 53 – Priorização do desenvolvimento do produto.

No gráfico da priorização do desenvolvimento do produto da Figura 53, obteve-se que aquando o processo de desenvolvimento do produto deve-se focar principalmente em aspetos como os tipos de materiais a considerar para as paredes exteriores, pavimento e cobertura, assim como as dimensões/volume em especial do pavimento e da cobertura. Noutro nível de priorização tem-se o peso da cobertura e das paredes exteriores, as dimensões/volume dos painéis das paredes exteriores e interiores e também o tipo de material das paredes interiores. O inverso aplica-se a detalhes do produto que dizem respeito às portas e às janelas.

4.2.2. Método do Esquema do Desenvolvimento do Produto (EDP)

O método do Esquema do Desenvolvimento do Produto (*Product Design Schematic*), proposto por *Salustri e Parmar* (107), é um diagrama em vez de uma tabela ou de uma descrição textual. Um esquema do problema dá uma sensação integrada do problema, aliviando o peso de compreender descrições longas com base em textos de requisitos.

Permite também visualizar os requisitos de diferentes maneiras, promovendo o pensamento mais claro e mais inovador relativamente às possíveis soluções.

É essencial compreender que o principal objetivo deste método é estimular o reconhecimento dos principais requisitos de todo o sistema.

Este método apresenta quatro categorias de requisitos de informação:

a) Caraterísticas do produto

Uma característica do produto (CP) é uma descrição do que um produto deve ou deveria ser. Consiste em formas adjetivas, como por exemplo um produto ser resistente, seguro ou durável.

Para sistemas mecânicos, estes incluem características como: funcionalidade, durabilidade, segurança, acessibilidade, usabilidade, fabricabilidade, facilidade de manutenção, sustentabilidade e qualidade. Destes derivam CPs especiais que são específicas para determinados produtos.

b) Requisitos funcionais

Um requisito funcional (RF) é uma declaração do que um produto deve ou deveria fazer.

c) Constrangimentos

Um constrangimento é um limite quantitativo sobre o grau em que um produto apresenta uma CP ou um RF. Este é constituído por três partes: um nome (peso, comprimento, etc.), um especificador de limite (mínimo, máximo, ou ótimo) e um valor (20 kg, 100 m/s, etc.).

d) Métricas de desempenho

A métrica de desempenho (MD) é uma medida quantificável do desempenho de um produto em relação a um constrangimento. O objetivo de uma MD é a representação da capacidade de um produto, na realidade o desempenho. De

modo a ganhar alguma compreensão geral de qual das possivelmente muitas alternativas é a melhor as MDs são definidas de modo a que um maior valor positivo indique uma capacidade mais desejável.

No diagrama do método EDP as características do produto são ligadas a requisitos funcionais (RFs) e a constrangimentos (Cs), e todos estes tipos ligados a métricas de desempenho (MD). O diagrama é organizado em linhas e colunas. As CPs são mostradas em azul, os RFs a verde, os Cs a vermelho e as MDs a amarelo. Os requisitos são mostrados em três intensidades: os requisitos considerados essenciais têm bordas grossas e a negrito; requisitos considerados menos importantes não têm fronteiras; o resto é de importância mediana. A ligação entre os vários nós com arcos simplifica a representação, eliminando as entradas duplicadas que aparecem em formatos tabulares convencionais para representar ciclos. CPs podem conectar-se a RFs ou a Cs; RFs também podem-se conectar a Cs; e Cs só podem conectar-se a MDs. As ligações são direcionadas da esquerda para a direita.

A codificação da cor é utilizada para distinguir diferentes tipos de informação. O esquema usado é arbitrário. A chave é usar um esquema de cores consistente para todos os EDPs de um produto, porque permite identificar os tipos de necessidades de informação de forma rápida e intuitiva. Tipicamente, as ligações são setas pretas, mas estas podem ser coloridas para realçar as interações.

4.2.2.1. Esquema representativo do desenvolvimento do produto

Aplicando a metodologia proposta pelo método do Esquema do *Design* do Produto e tendo em conta os critérios e constrangimentos do projeto foi possível esquematizar o que considera-se serem aspetos importantes a ter em conta ao longo do projeto.

De modo a responder aos requisitos priorizados pelo cliente e reajustados aquando a aplicação do método da matriz da qualidade, relativamente à facilidade de transportar a casa e montá-la chegou-se à conclusão que o tipo de estrutura que melhor responde a este requisito será a estrutura em painéis.

Na Figura 54 é possível observar o que se considera como sendo as características do produto ao nível da durabilidade, da manipulação, da funcionalidade e da fabricabilidade referentes ao painel da casa modular.

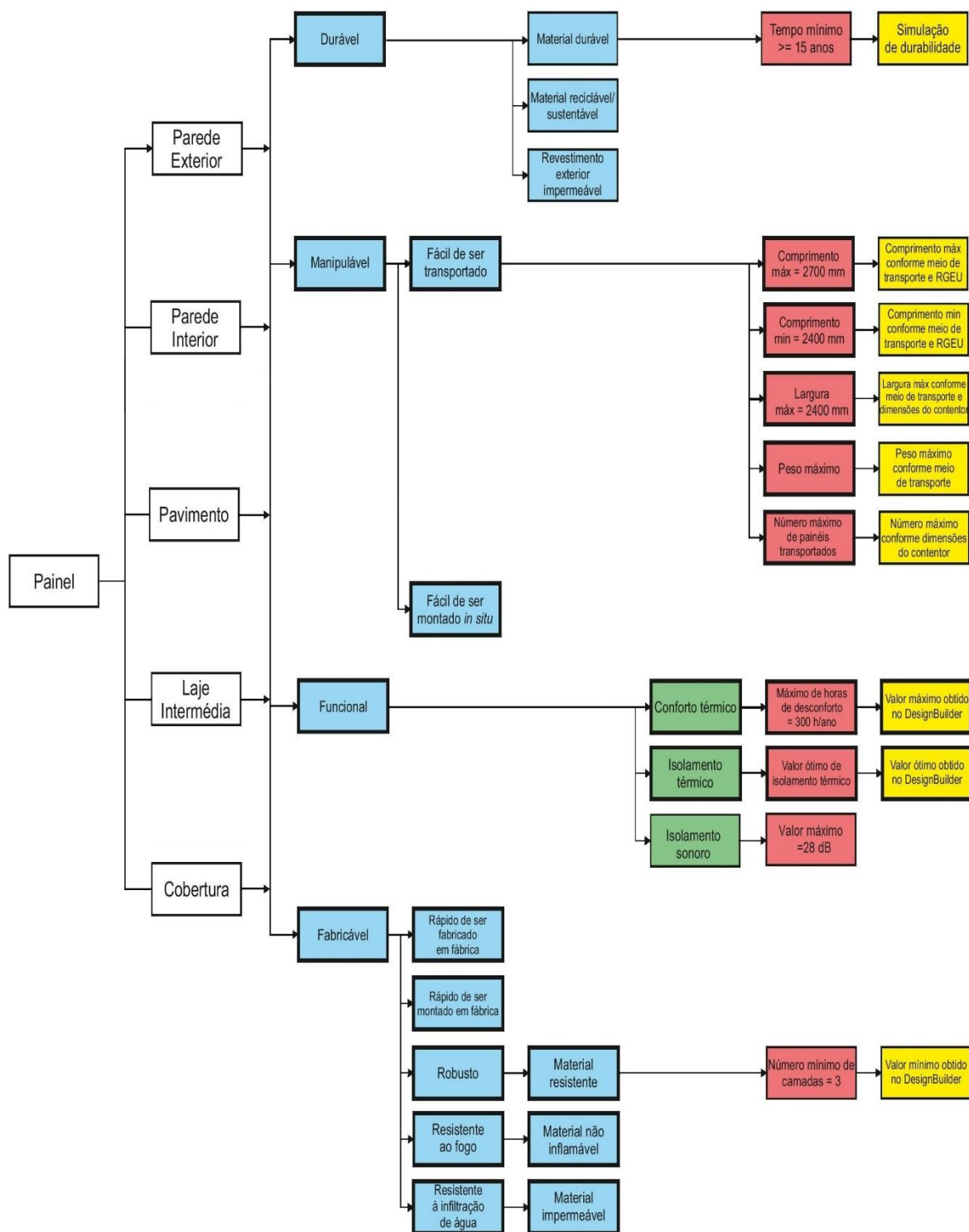


Figura 54 – Esquema do *design* do produto para o painel.

4.3. Desenvolvimento do módulo habitacional

4.3.1. Metodologia

No presente tópico é feita uma abordagem relativamente à metodologia adotada na realização do desenvolvimento do módulo habitacional.

Após o estudo relativo aos critérios e constrangimentos do projeto foi feito o estudo ao produto casa modular e respetivos painéis que a constituem, tendo como base os requisitos do consumidor.

Posteriormente, a metodologia seguida no projeto e no desenvolvimento do módulo habitacional em si consistiu em utilizar a informação relativa à casa modular resultante dos dois procedimentos em cima mencionados e modelar a três dimensões no *DesignBuilder* a arquitetura da casa modular, integrando os pormenores construtivos importantes de modo a caracterizar o comportamento térmico e os consumos energéticos para cada tipo de clima escolhido.

Ou seja, foi modelada uma casa modular de tipologia T₂ considerada a casa de referência. A partir desta e para cada clima serão feitas as alterações necessárias em termos dos elementos construtivos, desde a espessura das paredes aos materiais, percentagem de envidraçados, tipo de vidros, etc.

4.3.2. Tipologia do módulo habitacional

Depois de verificadas as dimensões habitacionais mínimas, de se ter concluído o estudo do dimensionamento do painel e qual o número máximo de painéis possíveis de serem transportados por contentores foi possível chegar a um modelo para o módulo habitacional para uma primeira abordagem, ou seja, sem os níveis de desconforto pretendidos.



Figura 55 - Aspeto exterior da casa modular referência de tipologia T₂

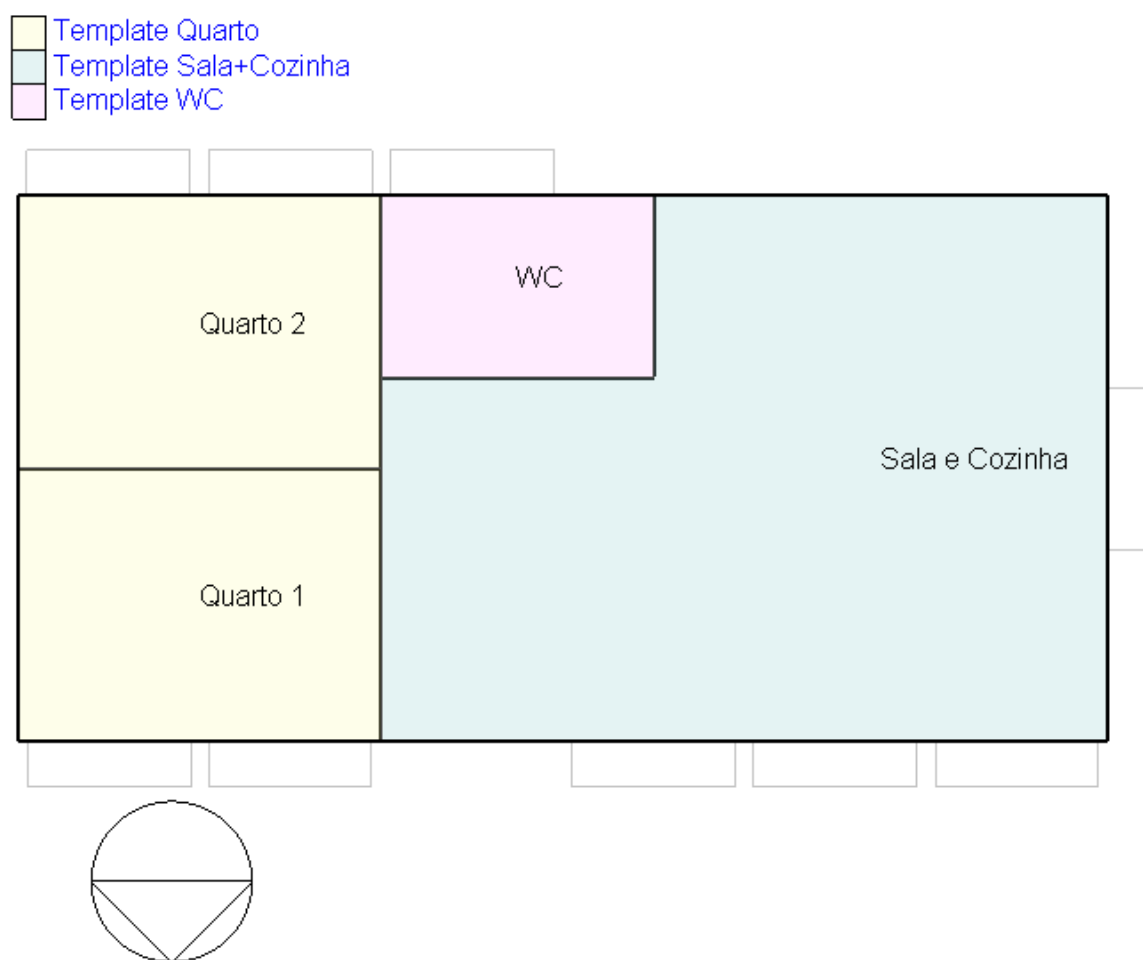


Figura 56 – Possível planta da casa modular para a tipologia T₂.

Como já mencionado, optou-se por uma tipologia do tipo T₂ por considerar-se que esta seja a tipologia mais comum para uma família atual. Deste modo, uma vez que a área bruta mínima para habitações desta tipologia é de 72 m², é apenas possível para esta tipologia, uma área retangular útil máxima de 72 m² (6x12 m) e respetivamente uma área bruta de 75 m², de modo a caber num contentor.

De referir que cada quarto tem 12 m² de área, a sala e a cozinha têm 42 m² e o WC tem uma área de 6 m².

Relativamente à planta apresentada na Figura 56 optou-se por colocar a casa de banho perto da cozinha de modo a que facilitasse o processo da instalação da canalização.

4.3.3. Análise de soluções construtivas

Tabela 10 - Caracterização dos elementos construtivos iniciais.

	Material	δ (m)	λ (W/m.k)	C_p (J/kg.K)	ρ (kg/m ³)	R (m ² /K/W)	U (W/m ² K)
Parede Externa	Pinho	0,0150	0,140	2720,0	419,0	2,301	0,435
	Superfície de metal	0,0020	45,280	500,0	7824,0		
	Placa de poliuretano	0,0510	0,026	1590,0	35,0		
	Superfície de metal	0,0020	45,280	500,0	7824,0		
	Pladur	0,0100	0,160	840,0	950,0		
Parede Interna	Pladur	0,0100	0,160	840,0	950,0	2,082	0,480
	Superfície de metal	0,0020	45,280	500,0	7824,0		
	Lã de rocha	0,0560	0,033	710,0	100,0		
	Superfície de metal	0,0020	45,280	500,0	7824,0		
	Pladur	0,0100	0,160	840,0	950,0		
Pavimento	Pinho	0,0150	0,140	2720,0	419,0	2,963	0,338
	Superfície de metal	0,0020	45,280	500,0	7824,0		
	Placa de Poliuretano	0,0660	0,026	1590,0	35,0		
	Superfície de metal	0,0020	45,280	500,0	7824,0		
	Pavimento de madeira	0,0150	0,140	1200,0	650,0		
Cobertura	Pinho	0,0150	0,140	2720,0	419,0	4,389	0,228
	Superfície de metal	0,0020	45,280	500,0	7824,0		
	Placa de Poliuretano	0,1010	0,026	1590,0	35,0		
	Superfície de metal	0,0020	45,280	500,0	7824,0		
	Painel de fibra de madeira	0,0150	0,100	1000,0	500,0		
	Pinho	0,0150	0,140	2720,0	419,0		

No que se refere às soluções construtivas, de modo a cumprir com os constrangimentos ao nível da espessura dos painéis tem-se na Tabela 10 a especificados os diversos materiais que constituem os diferentes tipos de painéis. Optou-se por utilizar acabamentos interiores e exteriores em madeira de Pinho e o material isolante escolhido foi espuma rígida de Poliuretano com uma densidade de 35 kg/m^3 . Para suportar a espuma rígida considerou-se uma superfície metálica de cada lado com espessura de 2 mm.

De referir que na tabela em cima tem-se que δ refere-se à espessura, por sua vez, λ refere-se à condutibilidade térmica, ou seja, à capacidade de o material conduzir energia térmica, o ρ diz respeito à densidade, o R à resistência térmica do material que corresponde à dificuldade de transmissão de calor e é determinada pelo quociente entre a espessura do material e a sua condutibilidade térmica, por fim o U diz respeito ao coeficiente de transferência de calor (110).

4.4. Resumo e conclusões do capítulo

O processo de desenvolvimento de novos produtos começa muitas vezes com uma ideia abstrata e termina com uma realização do produto.

A aplicação do método do Desdobramento da Função Qualidade (QFD) veio-se a provar bastante útil no processo de desenvolvimento do produto casa modular, uma vez que auxilia na competitividade global do produto.

Este é o único método de desenvolvimento de produtos orientados para o cliente, onde a "voz do cliente" é o ponto de partida de todas as atividades e transforma as expectativas do cliente em características do produto.

Da aplicação deste método, em concreto, da matriz qualidade, resultou que os requisitos do cliente a serem especialmente valorizados aquando o desenvolvimento do projeto são que a casa seja fácil de transportar, fácil de construir/montar, seja termicamente confortável, resistente, estável, durável e sustentável. O contrário é dito para aspetos como os espaços interiores, a disposição interior e o ser confortável a nível sonoro.

Relativamente às especificações do produto, de modo a cumprir com os requisitos do cliente, consideram-se prioritários aspetos como o tipo de estrutura que constituirá a casa, a percentagem de envidraçados, o número de elementos construtivos, o preço, a resistência do material da estrutura, o isolamento térmico e a configuração do sistema AVAC.

De modo a responder aos requisitos priorizados do cliente relativamente à facilidade de transportar a casa e montá-la, foi reforçada a ideia de um sistema pré-fabricado em painel, tendo sido integrada na matriz do produto como detalhes do produto.

Resultante da matriz do produto tem-se que a priorização do desenvolvimento do produto passa por dar mais importância a aspetos como os tipos de materiais a considerar para as paredes exteriores, pavimento e cobertura, assim como as dimensões/volume em especial do pavimento e da cobertura. Noutro nível de priorização tem-se o peso da cobertura e das paredes exteriores, as dimensões/volume dos painéis das paredes exteriores e interiores e também o tipo de material das paredes interiores. O inverso aplica-se a detalhes do produto que dizem respeito às portas e às janelas.

Com a utilização do diagrama do método do Esquema do Desenvolvimento do Produto (EDP) foi mais fácil compreender as relações existentes entre os requisitos permitindo chegar mais concretamente a algumas especificações do produto.

A partir deste método foi possível estabelecer-se alguns constrangimentos/objetivos para as características e requisitos funcionais do painel que constituirá a casa modular.

Por exemplo, pretende-se que os painéis sejam rápidos de ser fabricados e montados em fábrica, que sejam fabricados em materiais resistentes para lhe dar robustez, em materiais não inflamáveis para serem resistentes ao fogo e constituídos por materiais impermeáveis de modo a evitar a infiltração de água. Colocou-se, no entanto, apenas constrangimentos relativamente ao número mínimo de camadas que constituem os painéis, tendo-se estipulado que seria no mínimo três camadas para um painel considerado básico.

Pretende-se que os painéis sejam feitos de materiais duráveis, sustentáveis e que o revestimento exterior seja impermeável. Pretende-se que estes sejam fáceis de

ser transportados, tendo-se como constrangimentos, o comprimento máximo de 2700 mm e mínimo de 2400 mm, a largura máxima de 2400 mm, o peso máximo e o número máximo de painéis a serem transportados. Pretende-se também que sejam fáceis de serem montados *onsite*, ou seja, no local de montagem pretendido. Especificamente ao nível do conforto térmico estabeleceu-se um máximo de 300 horas de desconforto anuais (cerca de 1 hora por dia).

5. Projeto de conforto térmico e de habitabilidade

5.1. Sumário

Na sociedade atual, a redução do impacto sobre o clima e o meio ambiente precisa de atenção imediata e o uso racional de energia é o maior desafio que a sociedade atual tem de ganhar.

Com o crescimento do setor dos edifícios o seu consumo energético tem aumentado, sendo o setor que mais energia consome no mundo e representa mais de um terço do consumo total final de energia e uma fonte igualmente importante de dióxido de carbono (111).

Devido a este facto a redução do consumo energético e a utilização de energias renováveis nos edifícios são consideradas duas medidas significativas na redução da dependência energética e emissão de gases de efeitos estufa.

A consciencialização destes factos levou ao surgimento de certificações energéticas na Europa e no resto do mundo de modo a incentivar a redução do uso de energia nos edifícios.

A certificação *Passivhaus*, desenvolvida pela primeira vez na Alemanha é, entre as certificações existentes atualmente, a que define o menor consumo de energia, impondo critérios mais apertados sobre as necessidades de aquecimento (112).

Estes critérios ou metas são possíveis de conquistar adotando determinadas estratégias aquando a conceção dos edifícios e utilizando tecnologias desenvolvidas que possibilitam a redução do uso de energia.

Neste trabalho foram utilizadas simulações dinâmicas de edifícios para projetar casas modulares energeticamente eficientes e os dados meteorológicos dos cinco países escolhidos a representar os cinco climas em estudo para avaliar a viabilidade técnica e económica da execução de normas adotadas na Casa Passiva. O programa utilizado foi a versão de teste beta do *DesignBuilder* v4.5.0.120, que serve de interface ao *EnergyPlus* utilizado nas simulações dinâmicas, desenvolvido pelo *DOE (USA Department of Energy)* e que cumpre com os requisitos da norma *ASHRAE 140-2004* (113).

5.2. Critérios, requisitos e indicadores associados ao projeto térmico

5.2.1. Critérios

Os critérios tidos em consideração aquando a realização do estudo para o projeto térmico foram que a casa tinha obrigatoriamente de ser confortável termicamente durante todo o ano e com consumo energético mínimo, independentemente do clima ou região, se possível uma Casa Passiva.

Define-se como Casa Passiva como sendo um edifício que utiliza componentes de elevada eficiência energética, que é confortável e ao mesmo tempo acessível (114). De acordo com este conceito, o clima ou a região geográfica não importa, uma vez que as Casas Passivas têm uma temperatura confortável durante todo o ano com consumos energéticos mínimos (115), tendo sido primeiramente projetadas para países frios do Norte da Europa. O aquecimento destes edifícios é feito de forma passiva, através do uso eficiente da energia solar, das fontes de calor internas e da recuperação de calor, sendo desnecessário recorrer ao sistemas de aquecimento convencionais, mesmo nos períodos de inverno mais rigorosos (116). Durante o verão, recorre-se à utilização de técnicas de arrefecimento passivo, tais como, mecanismos de sombreamento estratégico de modo a manter a temperatura interior no nível de conforto.

Para climas quentes, também foram demonstradas vastas poupanças, onde os edifícios geralmente requerem refrigeração ativa durante todo o verão.

Enquanto os edifícios considerados Casa Passiva são mantidos com critérios rigorosos de qualidade, o conceito em si é muito flexível e pode ser adaptado para uma variedade de usos de construção e a quase qualquer estilo de construção. Uma vez que este conceito é baseado em princípios físicos, cada edifício pode e deve ser adaptado ao seu clima particular (115).

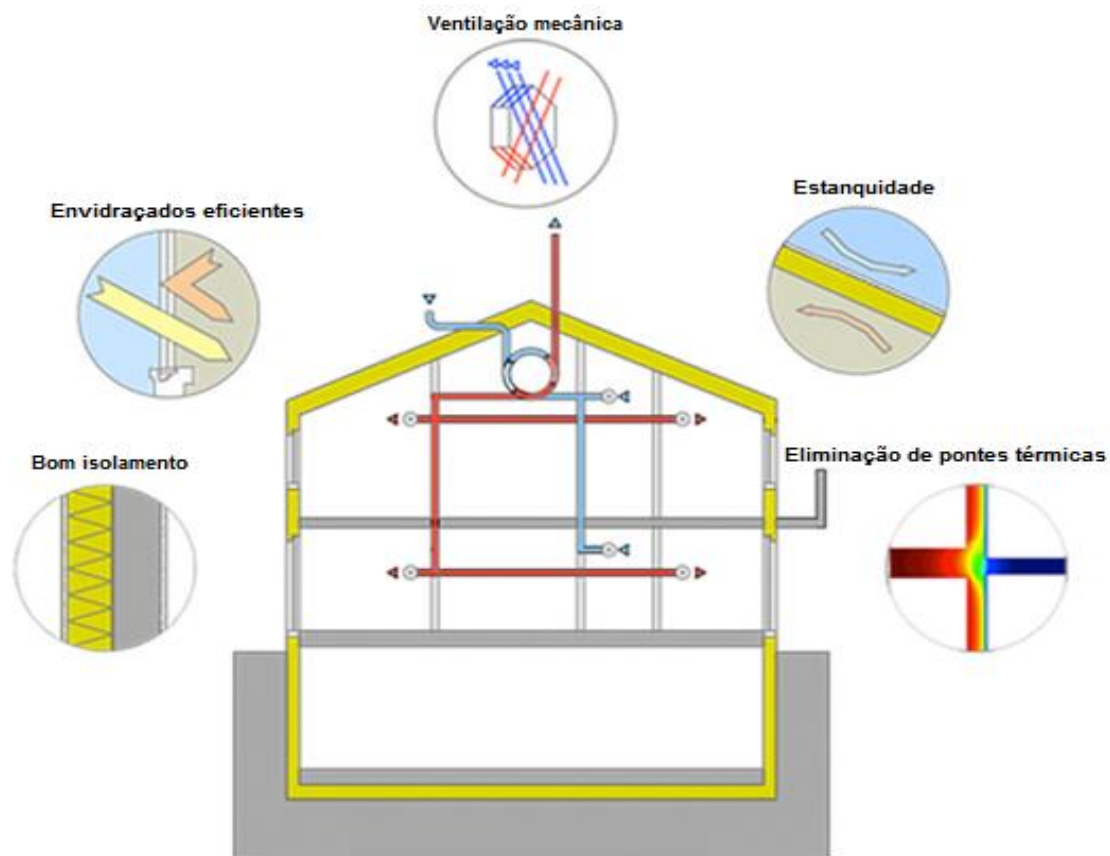


Figura 57 – Cinco critérios para uma Casa Passiva. Adaptado de (117).

Como mostrado na Figura 57 um dos cinco critérios para uma casa passiva é o bom isolamento térmico. A envolvente opaca exterior da casa deve ser muito bem isolada, especialmente em climas mais frios/temperados. Isto significa um coeficiente de transferência de calor (U) máximo de $0,15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Outro critério está relacionado com os vãos envidraçados, em que quer os caixilhos quer os vidros deverão apresentar um elevado desempenho térmico. Para climas mais frios/temperados, isso significa um valor U igual ou inferior a $0,80 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. A título comparativo, podemos considerar os valores máximos de referência para U a considerar no dimensionamento das envolventes opaca e envidraçada previstos pela regulamentação portuguesa (SCE, Decreto-Lei 118/2013) que serão respetivamente, $0,30$ e $2,20 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, (Portaria 349-B/2013) a partir de 1 de janeiro de 2016 (atualmente os valores são ainda mais elevados).

A estanquidade da casa ao ar é fundamental para o seu desempenho energético, sendo que, as infiltrações através de aberturas, frinchas e zonas de ligação entre

componentes devem ser inferiores a 0,6 renovações por hora (RPH) durante um teste de pressão a 50 Pascal (pressurizado e despressurizado).

Outro critério consiste em evitar a existência de pontes térmicas, que consistem em zonas da envolvente dos edifícios em que a resistência térmica é significativamente alterada em relação à da zona corrente e que pode ser causada pela existência local de materiais com diferentes condutibilidades térmicas e/ou por modificações na geometria da envolvente (118). É por isso importante planear e executar com muito cuidado todas as arestas, cantos, conexões e penetrações. As pontes térmicas, que não possam ser evitadas devem ser minimizadas tanto quanto possível.

Por último, é também fundamental uma eficiente recuperação de calor associada ao sistema de ventilação, permitindo uma boa qualidade do ar interior e economia de energia. Numa casa passiva, pelo menos 75% do calor do ar de exaustão é transferido para o ar fresco por meio de um permutador de calor.

5.2.1. Requisitos

Para que as metas propostas sejam alcançadas, é necessário ter em conta, não só os cinco critérios mencionados no ponto anterior mas também alguns requisitos associados a este conceito, apresentados na tabela em baixo.

Tabela 11 - Requisitos para uma Casa Passiva. Adaptado de (119) e de (120).

Requisitos
Necessidade de aquecimento < 15 kWh/(m ² ano) ou Carga máxima para aquecimento < 10 W/m ²
Necessidade de arrefecimento ≤ 15 kWh/(m ² ano) ou Carga máxima para arrefecimento < 10 W/m ²
Necessidades de energia primária < 120 kWh/(m ² ano)
Estanquidade ao ar < 0,6 RPH
Temperatura interior mínima de 20°C e máxima de 26°C
Excesso de temperatura < 10% do tempo

Ou seja, de modo a conseguir-se no final uma casa que seja considerada Casa Passiva, é necessário que esta cumpra com os princípios e requisitos já

mencionados, especialmente no que se refere ao conforto térmico e aos consumos máximos exigidos.

Uma vez que neste trabalho um dos climas em estudo abrange uma grande parte da Europa, para onde foram projetadas as primeiras Casas Passivas, neste caso em particular a Estónia, considera-se como sendo importante especificar quais os requisitos mínimos em vigor neste país.

Na Estónia a regulamentação define requisitos mínimos de desempenho energético em termos de indicador de energia primária para edifícios de quase zero energia (*nZEB*), edifícios de baixo consumo energético, como é o caso das Casas Passivas, e para todos os novos edifícios, bem como para grandes obras de renovação.

Como energia inclui-se o aquecimento, arrefecimento, ventilação, água quente sanitária, iluminação, eletricidade do sistema AVAC e eletricidade doméstica. Esta última é definida pelo uso padrão da necessidade doméstica, bem como pelos perfis de ocupação.

Tabela 12 – Requisitos de energia primária na Estónia, que entrou em vigor desde 9 Janeiro de 2013. Adaptado de (121).

	<i>nZEB</i> Classe A kWh/(m ² ano)	Baixa energia (Casa Passiva) Classe B kWh/(m ² ano)	Requisito mínimo para novos edifícios Classe C kWh/(m ² ano)
Casas isoladas	50	120	160

A energia primária é calculada com fatores de energia primária não-renováveis, que para a eletricidade é de 2,0, para o aquecimento urbano é de 0,9, para os combustíveis fósseis de 1,0 e para combustíveis renováveis de 0,75, neste país (121).

Em relação aos restantes países utilizados para o estudo, desconhece-se os fatores de conversão para energia primária desses países, tendo-se optado por utilizar o fator de energia primária da eletricidade da Alemanha cujo valor é de 2,6 (122), e dos valores mais altos para a eletricidade, uma vez que também no cálculo das necessidades de água quente sanitária, para todos os casos, utilizou-se também os requisitos alemães, como explicado no Anexo II.

5.2.2. Indicadores

Para que seja possível a verificação dos critérios mencionados anteriormente, é necessário recorrer a alguns indicadores calculados a partir de resultados obtidos por simulação usando o *DesignBuilder*, que suportarão o processo de tomada de decisões, nomeadamente no que diz respeito ao nível de conforto no interior da casa. Tem-se então:

- **Temperatura do ar interior** – a temperatura média calculada do ar.
- **Temperatura radiante interna** - a média da temperatura média radiante da zona, calculada assumindo que a pessoa está no centro da zona, sem ponderação para qualquer superfície particular.
- **Temperatura operativa interna** - A média da temperatura do ar interior e da média da temperatura radiante interna.
- **Temperatura de bulbo seco exterior** – dados relativos ao local.
- **Humidade relativa** - a média calculada da humidade relativa do ar.

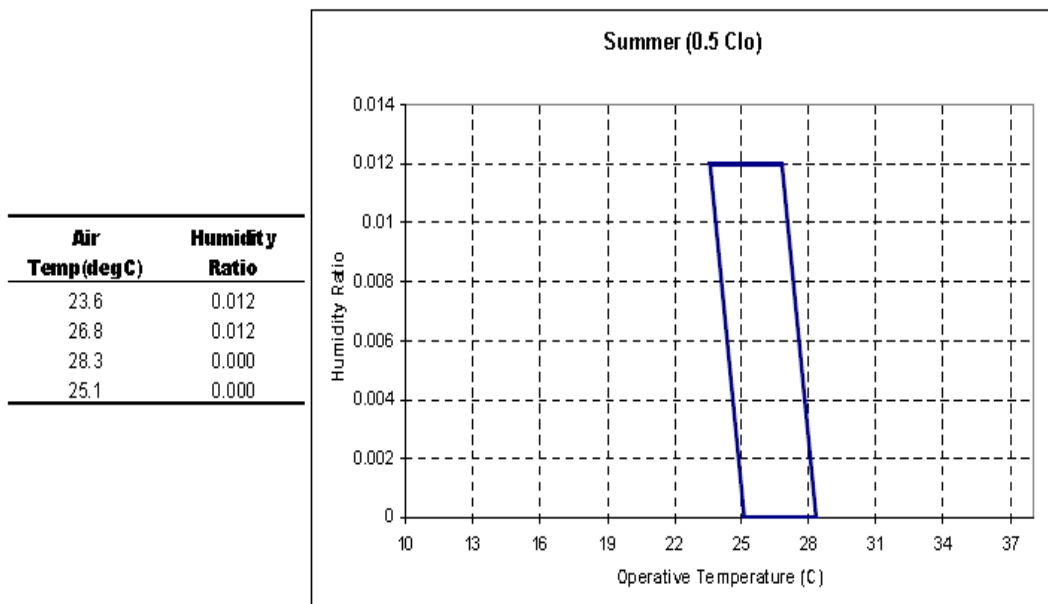


Figura 58 – Região de conforto para roupa de Verão (123).

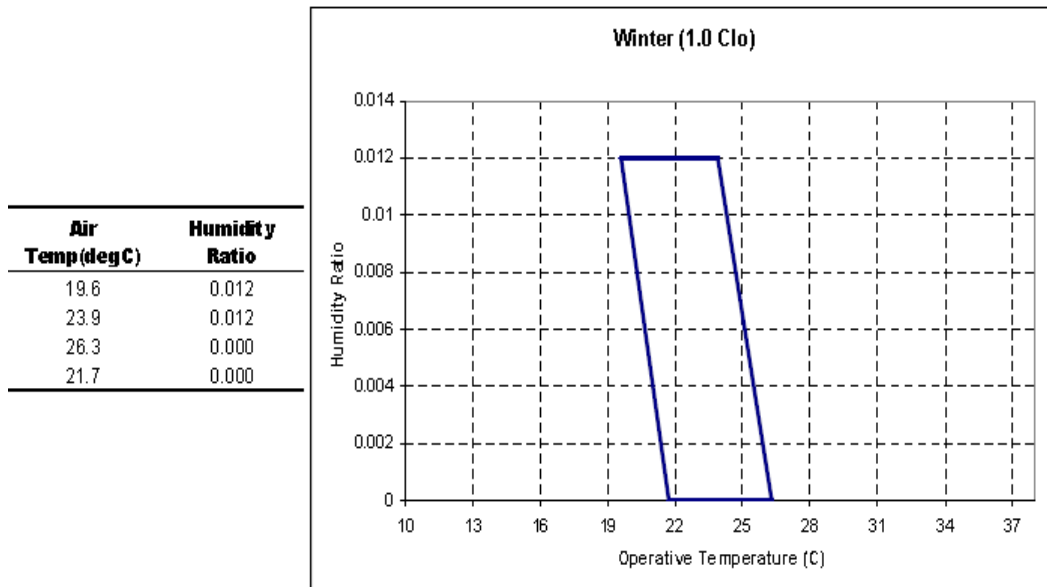


Figura 59 – Região de conforto para roupa de Inverno (123).

- **Horas de desconforto (roupa de verão)** – o número de horas em que a combinação do rácio de humidade e a temperatura operativa na zona não se encontra na região de conforto da roupa de verão da *ASHRAE 55-2004*, como mostrado na Figura 58 para o nível de 0,5 Clo.
- **Horas de desconforto (roupa de inverno)** – o número de horas em que a combinação do rácio de humidade e a temperatura operativa na zona não se encontra na região de conforto da roupa do inverno da *ASHRAE 55-2004*, como mostrado na Figura 59 para o nível de 1,0 Clo.
- **Horas de desconforto (toda a roupa)** - o número de horas em que a combinação do rácio de humidade e a temperatura operativa não se encontra na região de conforto da roupa de verão ou de inverno da *ASHRAE 55-2004*.

5.3. Perfis de utilização e cargas térmicas interiores

Os perfis de utilização são utilizados para definir os períodos de utilização e de funcionamento das diversas divisões ou zonas de um edifício.

De modo a que as simulações ao módulo sejam feitas com o maior rigor é necessário especificar para cada zona aspetos como, densidade de ocupação, iluminação, cargas térmicas interiores (equipamentos elétricos) e sistemas de climatização e de ventilação.

Nesta fase é também de grande importância a especificação dos valores máximos e mínimos da temperatura do ar no interior da casa a garantir pelos sistemas de climatização para cada zona térmica, os *setpoints* de temperatura.

Estes *setpoints* para as temperaturas de aquecimento e de arrefecimento são determinados pelo método gráfico, definido na norma *ASHRAE Standard 55-2004* (Figura 58 e Figura 59) Condições Térmicas Ambientais para a Ocupação Humana (*Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*). Este método pode ser aplicado a ambientes interiores onde os ocupantes exerçam atividades sedentárias correspondentes a taxas metabólicas que variem entre 1 e 1,3 met, e em que a resistência térmica da roupa varia entre 0,5 Clo no Verão e 1 Clo no Inverno.

Habitualmente os espaços de um edifício com características semelhantes são agregados numa única zona, por prever-se que tenham um comportamento térmico semelhante. Em relação ao pequeno módulo em estudo, os quatro espaços correspondem a quatro zonas distintas, permitindo uma análise detalhada de cada espaço.

O valor da atividade metabólica para todos os climas estudados foi de 1 met, uma vez que o tipo de atividade considerada na casa é apenas *trabalho leve, estar de pé e caminhar*.

O número de pessoas habitual considerado para os quartos foi o máximo de duas pessoas por quarto, para a sala e cozinha quatro pessoas e para a WC apenas uma pessoa. No Anexo II são demonstrados os cálculos efetuados para a determinação de aspetos como a densidade ocupacional, consumos energéticos dos equipamentos da casa, convertidos em ganhos internos por área e também o

cálculo da iluminância atribuída a cada divisão da casa consoante o tipo de atividade.

Para o perfil de ocupação dos dois quartos estipulou-se que durante a semana estes encontram-se ocupados das 23h às 8h da manhã. Durante o fim de semana encontram-se ocupados das 00h às 9h da manhã. Relativamente ao funcionamento do sistema de climatização estipulou-se que a ativação seria com 2h de antecedência do perfil de ocupação dos quartos à semana e com 1h de antecedência ao fim de semana. Ou seja, tem-se que à semana o sistema de climatização inicia às 21h e ao fim de semana às 23h.

A zona térmica que diz respeito à sala e à cozinha, durante a semana tem um perfil de ocupação das 7h às 8h, altura da refeição da manhã. Voltando a ter ocupação das 17h às 24h, período de tempo que abrange refeições da parte da tarde, jantar e algum possível convívio na sala após o jantar. Aos fins-de-semana considerou-se um possível período de ocupação desde as 9h da manhã às 24h, o que encontra-se de certa forma sobredimensionado. Para o sistema de climatização programou-se que este inicia à semana com 1h de antecedência na parte da manhã, ou seja, inicia às 6h terminando às 8h. Na parte da tarde inicia às 16h terminando às 24h.

Para o horário de ocupação da WC considerou-se que esta está ocupada à semana em dois períodos, um das 7h às 8h da manhã e outro das 18h às 19h e aos fins de semana das 8h às 9h e das 19h às 20h. O sistema de climatização considerou-se que funciona à semana das 6h às 8h, estando das 6h às 7h a 50% do funcionamento. No segundo período inicia das 17h às 18h a 50% e a 100% das 18h às 19h. Ao fim de semana, na parte da manhã, das 8h às 9h encontra-se a 50% e das 9h às 10h a 100%. À tarde, encontra-se a 50% das 18h às 19h e a 100% das 19h às 20h.

Tabela 13 – Perfil de utilização utilizado no *DesignBuilder* para as quatro zonas do módulo habitacional para o clima BSh.

Clima BSh – Senegal/ Dakar				
	Quarto 1	Quarto 2	Sala e Cozinha	WC
Densidade de ocupação (pessoa/m ²)	0,17	0,17	0,13	0,17
Atividade metabólica		1,00		
Índice de clo de Inverno (clo)		1,00		
Índice de clo de Verão (clo)		0,50		
Temperatura de <i>setpoint</i> de aquecimento (°C)	22,0	22,0	22,0	21,5
<i>Setback</i> de aquecimento (°C)	15,0	15,0	15,0	16,0
Temperatura de <i>setpoint</i> de arrefecimento (°C)	23,0	23,0	23,0	21,5
<i>Setback</i> de arrefecimento (°C)	27,0	27,0	27,0	27,0
Ar fresco mínimo (l/s-pessoa)	5,6	5,6	10,0	8,0
Iluminação	Fluorescente T8 (25 mm diâmetro)			
Iluminância (lux)	200	200	314	400
Tipo de luminária		Suspensa		
Fração radiante		0,42		
Fração visível		0,18		
Ganhos internos fixos (W/m ²)	-	-	1	
Fração radiante	-	-	0,20	0,20
Ganhos internos instalados (W/m ²)	5	5	3	3
Fração radiante		0,20		

Tabela 14 - Perfil de utilização utilizado no *DesignBuilder* para as quatro zonas do módulo habitacional para o clima Aw.

Clima Aw – Honduras/ Tegucigalpa				
	Quarto 1	Quarto 2	Sala e Cozinha	WC
Densidade de ocupação (pessoa/m ²)	0,17	0,17	0,10	0,17
Atividade metabólica		1,00		
Índice de clo de Inverno (clo)		1,00		
Índice de clo de Verão (clo)		0,50		
Temperatura de <i>setpoint</i> de aquecimento (°C)	21,0	21,0	23,0	21,0
<i>Setback</i> de aquecimento (°C)	13,0	13,0	15,0	13,0
Temperatura de <i>setpoint</i> de arrefecimento (°C)	22,0	21,5	23,0	21,0
<i>Setback</i> de arrefecimento (°C)	28,0	28,0	29,0	26,0
Ar fresco mínimo (l/s-pessoa)	5,6	5,6	10,0	8,0
Iluminação	Fluorescente T8 (25 mm diâmetro)			
Iluminância (lux)	200	200	314	400
Tipo de luminária		Suspensa		
Fração radiante		0,42		
Fração visível		0,18		
Ganhos internos fixos (W/m ²)	-	-	1	
Fração radiante	-	-	0,20	0,20
Ganhos internos instalados (W/m ²)	5	5	3	3
Fração radiante		0,20		

Tabela 15 - Perfil de utilização utilizado no *DesignBuilder* para as quatro zonas do módulo habitacional para o clima BSk.

Clima BSk – Irã/ Teerão				
	Quarto 1	Quarto 2	Sala e Cozinha	WC
Densidade de ocupação (pessoa/m ²)	0,17	0,17	0,10	0,17
Atividade metabólica		1,00		
Índice de clo de Inverno (clo)		1,00		
Índice de clo de Verão (clo)		0,50		
Temperatura de <i>setpoint</i> de aquecimento (°C)	23,0	23,0	23,0	24,0
<i>Setback</i> de aquecimento (°C)	18,0	18,0	18,0	19,0
Temperatura de <i>setpoint</i> de arrefecimento (°C)	23,5	23,5	24,0	24,0
<i>Setback</i> de arrefecimento (°C)	28,0	28,0	30,0	28,0
Ar fresco mínimo (l/s-pessoa)	5,6	5,6	10,0	8,0
Iluminação	Fluorescente T8 (25 mm diâmetro)			
Iluminância (lux)	200	200	314	400
Tipo de luminária		Suspensa		
Fração radiante		0,42		
Fração visível		0,18		
Ganhos internos fixos (W/m ²)	-	-	1	
Fração radiante	-	-	0,20	0,20
Ganhos internos instalados (W/m ²)	5	5	3	3
Fração radiante		0,20		

Tabela 16 - Perfil de utilização utilizado no *DesignBuilder* para as quatro zonas do módulo habitacional para o clima Am.

Clima Am – Suriname/ Zanderij				
	Quarto 1	Quarto 2	Sala e Cozinha	WC
Densidade de ocupação (pessoa/m ²)	0,17	0,17	0,10	0,17
Atividade metabólica		1,00		
Índice de clo de Inverno (clo)		1,00		
Índice de clo de Verão (clo)		0,50		
Temperatura de <i>setpoint</i> de aquecimento (°C)	21,0	21,0	21,5	21,5
<i>Setback</i> de aquecimento (°C)	15,0	15,0	15,0	15,0
Temperatura de <i>setpoint</i> de arrefecimento (°C)	23,0	23,0	22,0	23,5
<i>Setback</i> de arrefecimento (°C)	27,0	27,0	27,0	27,0
Ar fresco mínimo (l/s-pessoa)	5,6	5,6	10,0	8,0
Iluminação	Fluorescente T8 (25 mm diâmetro)			
Iluminância (lux)	200	200	314	400
Tipo de luminária		Suspensa		
Fração radiante		0,42		
Fração visível		0,18		
Ganhos internos fixos (W/m ²)	-	-	1	
Fração radiante	-	-	0,20	0,20
Ganhos internos instalados (W/m ²)	5	5	3	3
Fração radiante		0,20		

Tabela 17 - Perfil de utilização utilizado no *DesignBuilder* para as quatro zonas do módulo habitacional para o clima Dfb.

Clima Dfb – Estónia/ Tallinn				
	Quarto 1	Quarto 2	Sala e Cozinha	WC
Densidade de ocupação (pessoa/m²)	0,17	0,17	0,10	0,17
Atividade metabólica		1,00		
Índice de clo de Inverno (clo)		1,00		
Índice de clo de Verão (clo)		0,50		
Temperatura de <i>setpoint</i> de aquecimento (°C)	22,5	22,5	22,0	23,0
<i>Setback</i> de aquecimento (°C)	17,5	17,5	17,5	18,0
Temperatura de <i>setpoint</i> de arrefecimento (°C)	25,0	25,0	25,0	23,0
<i>Setback</i> de arrefecimento (°C)	28,0	28,0	30,0	30,0
Ar fresco mínimo (l/s-pessoa)	5,6	5,6	10,0	8,0
Iluminação	Fluorescente T8 (25 mm diâmetro)			
Iluminância (lux)	200	200	314	400
Tipo de luminária	Suspensa			
Fração radiante		0,42		
Fração visível		0,18		
Ganhos internos fixos (W/m²)	-	-	1	
Fração radiante	-	-	0,20	0,20
Ganhos internos instalados (W/m²)	5	5	3	3
Fração radiante		0,20		

5.4. Comportamento térmico e de habitabilidade

Para avaliar as condições de conforto térmico e de habitabilidade no interior da casa modular utilizaram-se indicadores como a temperatura operativa, a humidade relativa e as horas de desconforto como explicado no ponto anterior.

Um dos requisitos para uma Casa Passiva é que esta seja termicamente confortável. A temperatura ao longo do ano deverá estar compreendida dentro do intervalo de conforto (temperatura mínima de 20°C e temperatura máxima de 26°C) e ter uma boa qualidade do ar interior (humidade relativa, CO₂), contribuindo para o bem-estar e saúde dos seus ocupantes.

Nas tabelas seguintes é possível observar para cada clima escolhido a evolução destes indicadores ao longo do ano para as diferentes divisórias da casa sem recurso à climatização.

a) Clima BSh – Senegal/ Dakar

Air Temperature (°C)	40,22
Radiant Temperature (°C)	40,28
Operative Temperature (°C)	40,25
Outside Dry-Bulb Temperature (°C)	28,52
Relative Humidity (%)	60,77
Discomfort hrs (all clothing) (hrs)	3241,13

Figura 60 - Médias anuais da temperatura do ar, da humidade relativa e das horas de desconforto no interior da casa sem climatização para o clima BSh.

Os gráficos apresentados na Figura 60 ilustram resumidamente o desempenho térmico muito fraco da casa referência sem climatização para o clima semiárido quente (BSh). Verifica-se que a temperatura operativa média anual é 40,25°C, que a temperatura do ar encontra-se a 40,22°C e que o número de horas de desconforto é extremamente elevado, cerca de 3241,13 horas. Na Tabela 18, observa-se que a temperatura ambiente no interior da casa é extremamente elevada ao longo do ano, encontrando-se muito acima dos 26°C requisitados.

Tabela 18 - Médias mensais da temperatura ambiente (T. A.), da temperatura operativa (T. Op.) e da humidade relativa (HR) no interior da casa modular sem climatização para o clima BSh.

Geral		Quarto 1			Quarto 2			Sala e Cozinha			WC		
Data (2002)	T. A. (°C)	T. A. (°C)	T. Op. (°C)	HR	T. A. (°C)	T. Op. (°C)	HR	T. A. (°C)	T. Op. (°C)	HR	T. A. (°C)	T. Op. (°C)	HR
01-01	39,53	38,94	39,00	64,79	40,38	40,46	62,48	39,37	39,31	62,77	39,84	40,02	41,84
01-02	40,79	40,47	40,55	59,93	41,03	41,12	59,09	40,86	40,81	58,09	40,61	40,79	40,03
01-03	40,39	40,27	40,34	60,24	40,33	40,41	60,12	40,58	40,52	59,19	39,85	40,02	41,35
01-04	39,76	39,78	39,84	62,48	39,54	39,60	62,82	39,99	39,91	63,51	39,05	39,21	45,78
01-05	39,40	39,69	39,78	64,04	38,99	39,06	65,16	39,62	39,58	66,04	38,49	38,65	49,57
01-06	38,63	39,01	39,10	65,41	38,09	38,15	66,97	38,90	38,85	69,74	37,61	37,78	52,32
01-07	38,93	39,31	39,40	64,71	38,41	38,48	66,24	39,19	39,16	67,40	37,89	38,06	51,39
01-08	40,34	40,53	40,63	62,61	39,98	40,07	63,45	40,60	40,56	63,24	39,43	39,60	47,27
01-09	41,72	41,72	41,82	59,80	41,62	41,72	59,94	41,90	41,86	58,59	41,02	41,20	42,48
01-10	41,17	41,00	41,10	61,33	41,32	41,42	60,90	41,26	41,24	60,46	40,77	40,95	43,74
01-11	41,31	40,82	40,91	61,68	41,89	42,00	60,10	41,25	41,21	61,14	41,41	41,59	42,35
01-12	40,79	40,05	40,13	61,54	41,85	41,96	58,74	40,55	40,49	62,07	41,31	41,49	40,49

b) Clima Aw – Honduras/ Tegucigalpa

Air Temperature (°C)	36,96
Radiant Temperature (°C)	36,86
Operative Temperature (°C)	36,91
Outside Dry-Bulb Temperature (°C)	28,46
Relative Humidity (%)	65,49
Discomfort hrs (all clothing) (hrs)	3314,92

Figura 61 - Médias anuais da temperatura do ar, da humidade relativa e das horas de desconforto no interior da casa sem climatização para o clima Aw.

Os gráficos apresentados na Figura 61 ilustram resumidamente o desempenho térmico muito fraco da casa referência sem climatização para o clima de savana tropical (Aw). Verifica-se que a temperatura operativa média anual é 36,91°C, que a temperatura do ar encontra-se a 36,96°C e que o número de horas de desconforto é extremamente elevado, cerca de 3314,92 horas. Na Tabela 19, observa-se que a temperatura ambiente no interior da casa é extremamente elevada durante todo o ano, encontrando-se muito acima dos 26°C requisitados.

Tabela 19 - Médias mensais da temperatura ambiente (T. A.), da temperatura operativa (T. Op.) e da humidade relativa (HR) no interior da casa modular sem climatização para o clima Aw.

Data (2002)	Geral		Quarto 1		Quarto 2			Sala e Cozinha			WC		
	T. A. (°C)	T. A. (°C)	T. Op. (°C)	HR	T. A. (°C)	T. Op. (°C)	HR	T. A. (°C)	T. Op. (°C)	HR	T. A. (°C)	T. Op. (°C)	HR
01-01	37,72	36,94	36,90	66,99	40,89	40,95	60,16	36,75	36,64	62,53	39,68	39,83	40,62
01-02	37,98	37,58	37,56	62,48	39,68	39,72	58,99	37,49	37,38	58,96	38,85	38,98	41,06
01-03	38,13	38,24	38,24	62,06	38,59	38,59	61,46	38,01	37,91	59,53	37,80	37,91	44,66
01-04	38,68	39,11	39,11	61,37	39,04	39,03	61,42	38,54	38,43	59,46	38,04	38,13	45,50
01-05	38,06	38,77	38,78	65,07	38,33	38,33	65,67	37,89	37,79	65,26	37,28	37,38	52,48
01-06	36,68	37,53	37,55	68,18	36,93	36,93	69,07	36,49	36,40	72,32	35,79	35,90	57,87
01-07	36,72	37,56	37,57	66,88	37,03	37,02	67,64	36,51	36,42	68,52	35,89	35,99	55,17
01-08	36,11	36,80	36,80	69,88	36,59	36,58	70,18	35,88	35,78	74,11	35,36	35,47	59,95
01-09	35,16	35,70	35,68	70,80	35,78	35,76	70,60	34,91	34,81	75,86	34,56	34,67	60,68
01-10	35,45	35,70	35,66	69,60	36,38	36,36	68,31	35,13	35,02	72,21	35,36	35,47	56,28
01-11	35,61	35,24	35,18	70,08	37,90	37,93	65,15	34,90	34,77	72,14	36,71	36,84	51,74
01-12	37,33	36,28	36,25	67,37	40,93	41,01	59,14	36,25	36,13	67,66	39,73	39,88	42,64

c) Clima BSk – Irão/ Teerão

Air Temperature (°C)	30,57
Radiant Temperature (°C)	30,48
Operative Temperature (°C)	30,52
Outside Dry-Bulb Temperature (°C)	17,27
Relative Humidity (%)	42,95
Discomfort hrs (all clothing) (hrs)	2916,19

Figura 62 – Médias anuais da temperatura do ar, da humidade relativa e das horas de desconforto no interior da casa sem climatização para o clima BSk.

Os gráficos apresentados na Figura 62 ilustram resumidamente o desempenho térmico fraco da casa referência sem climatização para o clima de semiárido frio (BSk). A temperatura operativa média anual é de 30,52°C, a temperatura do ar encontra-se a 30,57°C e o número de horas de desconforto é extremamente elevado, cerca de 2916,19 horas. Na Tabela 20, observa-se que a temperatura ambiente no interior da casa é elevada ao longo da maior parte do ano, especialmente no verão, encontrando-se acima dos 26°C.

Tabela 20 - Médias mensais da temperatura ambiente (T. A.), da temperatura operativa (T. Op.) e da humidade relativa (HR) no interior da casa modular sem climatização para o clima BSk.

	Geral		Quarto 1		Quarto 2			Sala e Cozinha			WC		
Data (2002)	T. A. (°C)	T. A. (°C)	T. Op. (°C)	HR	T. A. (°C)	T. Op. (°C)	HR	T. A. (°C)	T. Op. (°C)	HR	T. A. (°C)	T. Op. (°C)	HR
01-01	20,96	24,59	24,50	48,04	18,68	18,49	53,17	21,18	21,10	42,33	16,67	16,79	30,95
01-02	22,54	25,87	25,84	45,08	20,25	20,13	49,93	22,81	22,76	42,04	18,54	18,68	28,96
01-03	25,94	27,98	27,95	48,91	24,80	24,71	52,16	26,09	26,02	44,40	23,14	23,28	29,41
01-04	28,75	29,62	29,57	50,66	28,77	28,70	51,51	28,71	28,61	44,99	27,23	27,37	37,66
01-05	32,87	33,33	33,30	51,50	33,38	33,36	51,67	32,72	32,65	43,45	32,00	32,14	26,68
01-06	38,30	38,32	38,33	47,26	38,92	38,95	46,47	38,17	38,09	35,67	37,98	38,11	19,91
01-07	39,07	39,27	39,27	47,89	39,60	39,60	47,45	38,93	38,83	36,71	38,64	38,75	22,80
01-08	39,15	39,50	39,50	48,02	39,10	39,09	48,64	39,21	39,11	36,40	38,16	38,26	23,22
01-09	36,70	38,29	38,33	47,31	35,47	35,44	50,71	36,91	36,85	38,54	34,52	34,63	25,05
01-10	31,43	34,54	34,56	48,03	29,39	29,30	53,51	31,60	31,58	43,09	28,13	28,25	27,97
01-11	28,59	33,39	33,43	45,12	24,99	24,89	53,40	28,95	28,97	43,91	23,65	23,77	29,89
01-12	22,04	25,60	25,54	46,79	19,34	19,19	53,66	22,41	22,31	46,13	17,74	17,86	33,74

d) Clima Am – Suriname/ Zanderij

Air Temperature (°C)	36,51
Radiant Temperature (°C)	36,38
Operative Temperature (°C)	36,44
Outside Dry-Bulb Temperature (°C)	28,52
Relative Humidity (%)	67,73
Discomfort hrs (all clothing) (hrs)	3314,92

Figura 63 - Médias anuais da temperatura do ar, da humidade relativa e das horas de desconforto no interior da casa sem climatização para o clima Am.

Os gráficos apresentados na Figura 63 ilustram resumidamente o desempenho térmico muito fraco da casa referência sem climatização para o clima de monção tropical (Am). Verifica-se que a temperatura operativa média anual é 36,44°C, que a temperatura do ar encontra-se a 36,51°C e que o número de horas de desconforto é extremamente elevado, cerca de 3314,92 horas, valor semelhante ao do clima de savana tropical (Aw). Na Tabela 21, observa-se que a temperatura ambiente no interior da casa é extremamente elevada ao longo do ano, encontrando-se muito acima dos 26°C requisitados.

Tabela 21 - Médias mensais da temperatura ambiente (T. A.), da temperatura operativa (T. Op.) e da humidade relativa (HR) no interior da casa modular sem climatização para o clima Am.

	Geral		Quarto 1		Quarto 2			Sala e Cozinha			WC		
Data (2002)	T. A. (°C)	T. A. (°C)	T. Op. (°C)	HR	T. A. (°C)	T. Op. (°C)	HR	T. A. (°C)	T. Op. (°C)	HR	T. A. (°C)	T. Op. (°C)	HR
01-01	36,06	36,06	36,01	69,44	37,38	37,37	67,18	35,64	35,51	68,43	36,45	36,57	50,16
01-02	36,97	37,14	37,12	65,12	37,63	37,63	64,30	36,75	36,62	64,91	36,87	36,97	48,93
01-03	36,64	36,99	36,96	65,38	37,07	37,05	65,21	36,49	36,35	65,89	36,15	36,24	50,49
01-04	36,20	36,66	36,62	67,44	36,47	36,43	67,72	36,08	35,94	69,84	35,52	35,60	55,05
01-05	35,95	36,68	36,67	68,98	36,06	36,02	70,08	35,83	35,73	72,59	35,06	35,15	59,62
01-06	35,41	36,21	36,20	70,11	35,37	35,33	71,66	35,34	35,23	75,68	34,39	34,49	62,09
01-07	35,58	36,39	36,39	69,58	35,57	35,54	71,10	35,50	35,40	73,82	34,54	34,64	61,45
01-08	36,53	37,18	37,18	68,01	36,71	36,69	68,83	36,42	36,31	71,31	35,65	35,75	57,91
01-09	37,47	37,94	37,93	65,62	37,89	37,88	65,70	37,30	37,18	67,40	36,84	36,93	53,17
01-10	37,13	37,46	37,45	66,82	37,75	37,74	66,35	36,91	36,80	68,81	36,80	36,91	54,07
01-11	37,28	37,33	37,31	67,27	38,31	38,32	65,69	36,95	36,83	69,14	37,47	37,59	52,12
01-12	36,95	36,80	36,77	66,81	38,48	38,51	63,96	36,47	36,33	69,08	37,58	37,70	49,26

e) Clima Dfb – Estónia/ Tallinn

Air Temperature (°C)	17,97
Radiant Temperature (°C)	17,72
Operative Temperature (°C)	17,84
Outside Dry-Bulb Temperature (°C)	5,18
Relative Humidity (%)	52,99
Discomfort hrs (all clothing) (hrs)	3023,71

Figura 64 - Médias anuais da temperatura do ar, da humidade relativa e das horas de desconforto no interior da casa sem climatização para o clima Dfb.

Os gráficos apresentados na Figura 64 ilustram resumidamente o desempenho térmico fraco da casa referência sem climatização para o clima continental de verão quente (Dfb). Verifica-se que a temperatura operativa média anual é 17,84°C, que a temperatura do ar encontra-se a 17,97°C e que o número de horas de desconforto é extremamente elevado, cerca de 3023,71 horas. Na Tabela 22, observa-se que a temperatura ambiente no interior da casa é bastante baixa no inverno e elevada durante o verão.

Tabela 22 - Médias mensais da temperatura ambiente (T. A.), da temperatura operativa (T. Op.) e da humidade relativa (HR) no interior da casa modular sem climatização para o clima Dfb.

	Geral		Quarto 1		Quarto 2			Sala e Cozinha			WC		
Data (2002)	T. A. (°C)	T. A. (°C)	T. Op. (°C)	HR	T. A. (°C)	T. Op. (°C)	HR	T. A. (°C)	T. Op. (°C)	HR	T. A. (°C)	T. Op. (°C)	HR
01-01	7,17	7,69	7,41	51,72	7,56	7,28	51,86	7,23	6,96	46,06	4,88	4,94	48,58
01-02	7,64	8,33	8,14	43,11	8,29	8,11	43,92	7,53	7,32	39,74	5,71	5,81	39,96
01-03	12,64	13,58	13,43	49,55	13,31	13,15	51,00	12,44	12,24	46,14	10,79	10,90	41,06
01-04	19,59	20,95	20,89	52,45	20,86	20,80	54,98	19,00	18,89	48,95	18,45	18,63	36,42
01-05	26,25	28,16	28,20	51,75	27,77	27,82	54,29	25,37	25,35	48,06	25,63	25,85	32,39
01-06	29,64	31,31	31,38	56,18	31,04	31,12	57,59	28,81	28,81	55,88	29,27	29,50	37,31
01-07	30,51	31,95	31,99	57,95	32,15	32,22	58,76	29,65	29,62	57,69	30,38	30,59	39,84
01-08	27,67	28,84	28,80	64,23	28,98	28,95	64,83	27,04	26,93	65,07	27,08	27,24	49,38
01-09	21,35	22,22	22,08	66,44	22,14	22,00	67,24	21,06	20,86	63,25	20,00	20,11	51,62
01-10	15,97	16,58	16,38	66,64	16,49	16,28	67,28	15,88	15,63	60,22	14,25	14,32	53,86
01-11	9,04	9,28	9,03	55,85	9,16	8,92	56,01	9,23	8,95	50,32	6,95	7,01	50,64
01-12	7,39	7,40	7,14	51,77	7,27	7,01	51,87	7,73	7,44	46,52	5,19	5,24	48,74

5.5. Soluções de climatização avaliadas

A climatização consiste no processo de tratamento do ar onde se controla em simultâneo a temperatura, a humidade, a limpeza e a distribuição do ar de modo a responder às exigências do espaço climatizado. Esta é muitas vezes feita recorrendo-se a sistemas de ar condicionado, sistemas de ventilação e filtragem do ar e sistemas de aquecimento central (124).

Neste projeto optou-se por especificar um sistema de ar condicionado do tipo *multi-split* com ventilação, composto por uma unidade exterior e quatro unidades no interior de cada espaço a condicionar.

Estes sistemas são compactos, fabricados em série, são instalados perto dos ambientes que condicionam e utilizam o sistema de expansão direta de um fluido refrigerante uma vez que os principais elementos que compõem o ciclo frigorífico são o evaporador, o compressor, o condensador e o dispositivo de expansão.

Estes aparelhos são dotados de componentes como o compressor, o condensador arrefecido com ar, o dispositivo de expansão, a serpentina de arrefecimento e desumidificação do tipo expansão direta, filtros e ventiladores para a circulação do ar condicionado e para o arrefecimento do condensador.

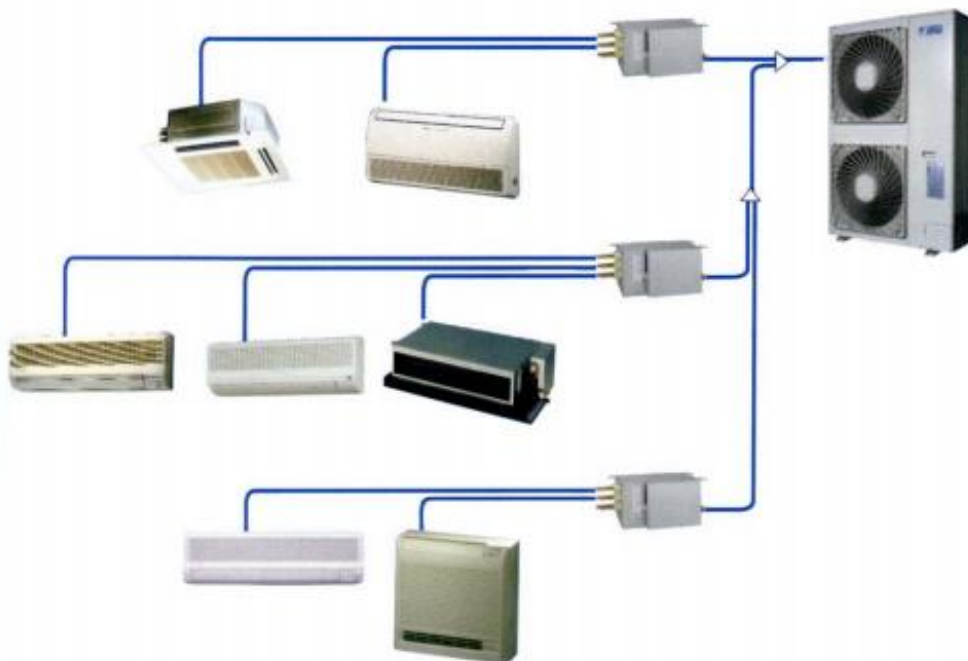


Figura 65 – Sistema *multi-split* (125).

No ar condicionado do tipo *multi-split*, o evaporador e o condensador encontram-se separados e interligados através de tubulações de cobre, o que permite uma grande distância entre as unidades, proporcionando um menor nível de ruído e uma melhor distribuição do ar devido à grande área de insuflação do ar, o que o torna mais económico (126). Outras vantagens deste tipo de sistema são a sua fácil manutenção, a facilidade de montagem, o facto de ocuparem pouco espaço, de permitirem o controlo individual dos *setpoints* da temperatura ambiente e possibilidade de utilizar diferentes estilos e capacidades de unidades interiores (127).

Por outro lado, como principais desvantagens tem-se que não apresentam versatilidade a alterações, são pouco robustos em termos técnicos e funcionais, possuem uma potência instalada reduzida e os limites de potência são limitados, e por fim, estes interferem no aspeto das fachadas dos edifícios uma vez que o condensador é exposto.

a) Ventilação mecânica

A ventilação mecânica ou ventilação forçada é usada para controlar a qualidade do ar interior. O excesso de humidade, os odores e os contaminantes podem normalmente ser controlados através de diluição ou de substituição pelo ar exterior. No entanto, em climas húmidos será necessário muita energia para remover o excesso de humidade do ar de ventilação.

- **Economizador (*Free cooling*)**

O *Free cooling* é uma técnica que é utilizada em alguns sistemas de Aquecimento Ventilação e Ar Condicionado (AVAC). Esta explora a existência de diferenças de temperatura entre os ambientes (entalpia) para a produção de arrefecimento, utilizando a temperatura do ar exterior para arrefecerem o elemento de refrigeração, seja este, líquido, sólido ou gasoso, sem o auxílio de máquinas ativas que agilizem a permutação de calor como é o caso dos ventiladores.

O Economizador permite realizar essa técnica de arrefecimento, poupando-se energia, uma vez que a bateria de frio do sistema AVAC não é utilizada, obtendo-

se assim uma gratuidade ou pelo menos uma redução significativa nos custos de climatização.

- **Ventilação com recuperação de calor**

Unidades de ventilação com recuperação de calor são a chave no que se refere à poupança de energia, uma vez que asseguram que o calor transportado pelo ar de exaustão não seja desperdiçado. Este é primeiro transferido para o ar fresco de entrada sem que as duas correntes de ar se misturem fisicamente. Em condições extremamente quentes, os permutadores de calor também podem funcionar no sentido inverso, de modo a que o calor transportado pelo ar de entrada seja transferido para o ar de escape e, assim, pré-arrefecido antes de entrar nos compartimentos. Estes sistemas também devem ser equipados com *Bypass* controlados automaticamente, permitindo assim ao ar que entra, ignorar a troca de calor (128). Este método pode ser utilizado em especial, durante a noite, quando os dias são quentes e as noites são frias.

Na tabela seguinte encontram-se as características técnicas da solução para o sistema de ventilação mecânica, dimensionada no *DesignBuilder*.

Tabela 23 - Caracterização técnica da solução para a ventilação mecânica dimensionada.

Ventilação mecânica		
Ventilador	Modo de operação	Contínua
	Eficiência total	70%
	Ventilador de ar	100%
Economizador (Free cooling)	Tipo	Bulbo seco diferencial
	Taxa máxima do ar exterior	15 (ac/h)
Recuperador de calor	Tipo	Sensível
	Eficácia	80%
	Eficácia de recuperação do calor latente	65%
	Setpoint da temperatura de aquecimento	15°C

b) Arrefecimento

As funções de arrefecimento e de desumidificação realizam-se de forma simultânea nas baterias de refrigeração dos equipamentos de ar condicionado, normalmente no verão ou em outras épocas quentes e húmidas. A humidade contida no ar que

circula é eliminada por condensação efetuada quando este entra em contacto com a serpentina da bateria de arrefecimento, mantida a uma temperatura inferior à do ponto de saturação.

No processo de arrefecimento, o gás sai do compressor a alta pressão e temperatura. No caminho que percorre no condensador este vai perdendo calor e continua a perder no elemento de expansão (tubo capilar e filtro secador). No evaporador, o gás chega frio, encontrando-se pronto para arrefecer o ambiente interno e carregando o calor para o ambiente exterior (126).

Na tabela seguinte encontra-se a caracterização técnica da solução dimensionada para o arrefecimento da casa modular, onde se pode observar os valores impostos no *DesignBuilder*.

Tabela 24 – Caracterização técnica da solução para o arrefecimento

Arrefecimento	
Combustível	Eletricidade
COP	3,26
Tipo de sistema de aquecimento	Convectivo
Temperatura máxima do ar fornecido	12°C
Humidade do ar fornecido	0,008 (g/g)

a) Aquecimento

O aquecimento do ar, que é feito normalmente no inverno, efetua-se na bateria de aquecimento. Para aplicações de ar condicionado, em sistemas de expansão direta, pode-se usar a mesma bateria, através do sistema de bomba de calor.

No processo de aquecimento, o princípio é o mesmo ao do arrefecimento, no entanto, o gás vai primeiro para o evaporador, sendo o mesmo processo mas no sentido inverso.

Na tabela seguinte encontra-se a caracterização técnica da solução dimensionada para o aquecimento da casa modular, onde se pode observar os valores considerados.

Tabela 25 - Caracterização técnica da solução para o aquecimento dimensionada

Aquecimento	
Combustível	Eletricidade
COP	4,0
Tipo de sistema de aquecimento	Convectivo
Temperatura máxima do ar fornecido	35°C
Humidade do ar fornecido	0,016 (g/g)

As soluções de climatização avaliadas para os cinco tipos de clima acabaram por divergir em duas soluções, onde os climas quentes como BSh, Aw e Am partilham da mesma solução e os climas mais frios partilham outra solução de climatização. Para os climas quentes não se considerou ventilação mecânica, enquanto, para os climas frios esta foi implementada e tida em conta no procedimento de simulação.

5.5.1. Estimativa e caracterização de consumo energético

A metodologia seguida na fase de caracterização do consumo energético da casa de referência passou numa primeira fase por implementar as soluções de climatização mais adequadas a cada clima. O segundo passo, consistiu em determinar qual a orientação da casa que mais contribuísse para um menor consumo energético, tendo-se procedido a quatro simulações para cada uma das orientações principais (0° para fachada virada a Norte, 90° virada a Oeste, 180° virada a Sul e 270° virada a Este).

De referir que entende-se por energia total consumida como sendo o somatório das necessidades de aquecimento, arrefecimento, eletricidade doméstica (equipamentos, etc), iluminação e a necessidade de água quente sanitária (AQS). A energia primária total consumida consiste na multiplicação do total da energia consumida pelo fator de energia primária que é diferente de país para país.

Nas tabelas seguintes das médias mensais da temperatura e da humidade no interior da casa modular com climatização, serão marcadas a vermelho as temperaturas que não se encontrem dentro dos limites requeridos, entre 20°C e 26°C, de modo a facilitar a leitura.

De notar que, nas simulações efetuadas, não se teve em consideração o controlo da humidade, muitas vezes também implementado nos sistemas de climatização. Esta escolha deveu-se ao facto de que no estudo realizado pretende-se chegar a conclusões ao nível das opções construtivas, onde a humidade não afeta estas opções construtivas, afetando apenas o conforto térmico e tendo implicações significativas ao nível do consumo energético.

Não se considerou também ventilação natural o que poderia, em alguns climas, afetar significativamente o consumo energético, diminuindo, por exemplo os valores da necessidade de arrefecimento para climas mais quentes.

a) Clima BSh – Senegal/ Dakar

Tabela 26 – Resultados das simulações para diferentes orientações da casa referência.

Orientação da fachada da frente	Consumo anual total (kWh/m²ano)	Desconforto anual (horas)
0°	85,95	220,88
90°	91,16	237,67
180°	85,09	248,64
270°	90,22	196,19

De acordo com as simulações efetuadas (Tabela 26), optou-se por orientar a casa a 180°, ou seja, a fachada principal da casa encontra-se virada para Norte.

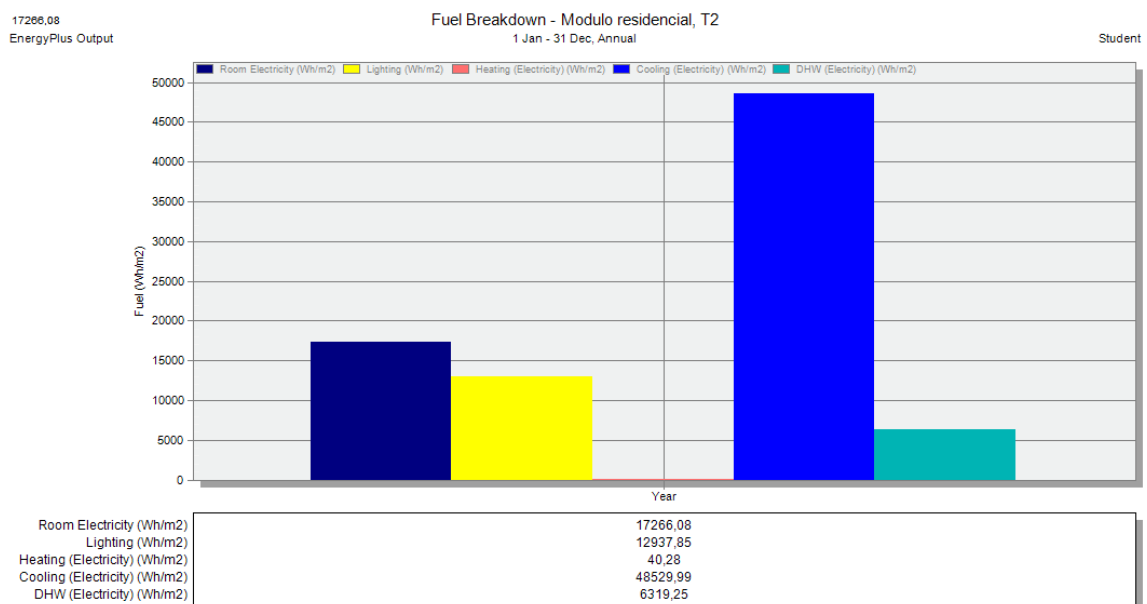


Figura 66 - Consumo energético anual desagregado na casa com climatização no clima BSh.

Na casa de referência para o clima semiárido quente (BSh), tem-se que a necessidade de aquecimento é quase nula, enquanto que a necessidade de arrefecimento é elevada, como seria de esperar para este clima. A energia total consumida é de 85,09 kWh/m²ano, sendo a energia primária total consumida de 221,24 kWh/(m²ano), aplicando um fator de energia primária de 2,6, como explicado anteriormente.

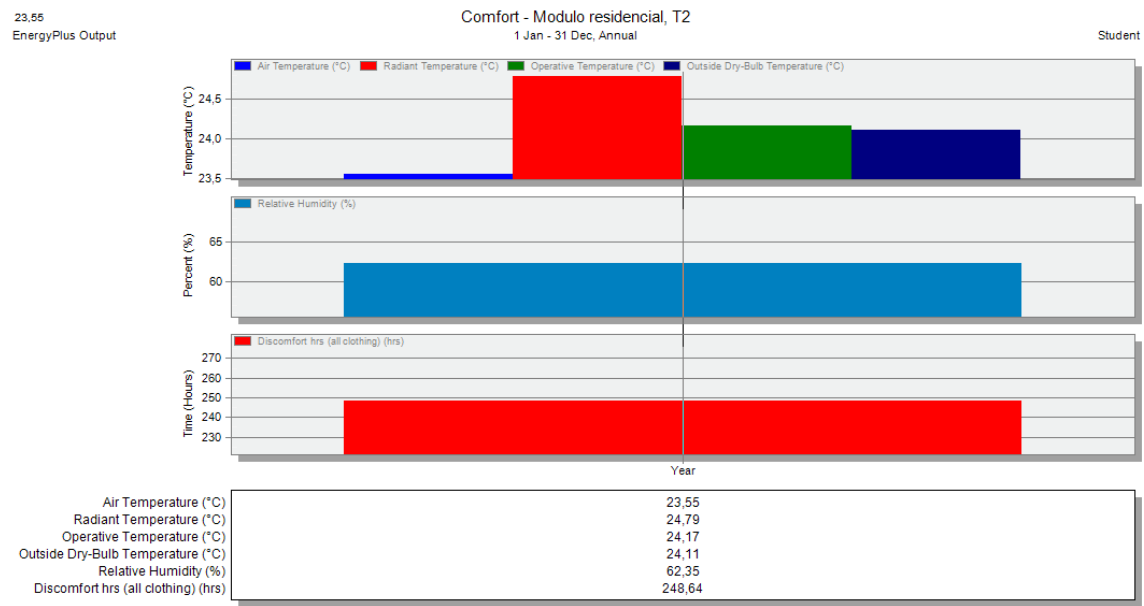


Figura 67 - Médias anuais da temperatura do ar, da humidade relativa e das horas de desconforto no interior da casa com climatização para o clima BSh.

Com a implementação do sistema de climatização conseguiu-se atingir temperaturas de conforto (entre os 20°C e os 26°C) durante todo o ano, para todos os compartimentos da casa. A temperatura operativa média é de 24,17 °C e a temperatura média no interior da casa é de 23,55°C. O número de horas de desconforto anuais também desceu significativamente passando de 3241,13 horas para 248,64 horas.

Tabela 27 - Médias mensais da temperatura ambiente (T. A.), da temperatura operativa (T. Op.) e da humidade relativa (HR) no interior da casa modular com climatização para o clima BSh.

Geral		Quarto 1 – Norte/Este			Quarto 2 – Sul/ Este			Sala e Cozinha – Norte/Sul/Oeste			WC - Sul		
Data (2002)	T. A. (°C)	T. A. (°C)	T. Op. (°C)	HR	T. A. (°C)	T. Op. (°C)	HR	T. A. (°C)	T. Op. (°C)	HR	T. A. (°C)	T. Op. (°C)	HR
01-01	23,28	24,15	24,38	56,50	24,13	24,82	54,50	22,57	22,99	57,20	24,83	25,21	48,56
01-02	23,26	24,15	34,42	58,08	24,19	24,70	55,92	22,60	23,04	60,56	24,21	24,54	53,77
01-03	23,26	24,24	24,58	59,36	24,25	24,65	58,52	22,62	23,13	63,93	23,86	24,14	59,32
01-04	23,31	24,28	24,67	60,05	24,28	24,67	59,95	22,68	23,20	66,07	23,79	24,03	63,02
01-05	23,53	24,24	24,86	58,67	24,24	24,82	59,34	22,99	23,65	66,89	24,44	24,71	65,08
01-06	23,61	24,20	24,95	58,24	24,22	24,91	59,05	23,07	23,84	66,46	24,98	25,25	66,93
01-07	23,73	24,11	24,97	58,25	24,13	24,95	58,74	23,25	24,09	65,24	25,54	25,81	66,89
01-08	23,76	24,14	24,95	60,37	24,14	24,95	60,52	23,27	24,09	67,43	25,63	25,89	71,22
01-09	23,74	24,14	24,96	59,57	24,13	24,98	59,40	23,23	24,08	66,95	25,79	26,06	69,38
01-10	23,80	24,21	24,94	59,90	24,13	25,00	58,80	23,28	24,07	66,58	24,97	26,26	67,20
01-11	23,73	24,26	24,86	58,78	24,06	25,01	56,79	23,14	23,84	66,81	26,16	26,52	61,24
01-12	23,58	24,24	24,64	57,70	24,05	24,94	54,89	22,95	23,49	62,11	25,75	26,15	53,68

b) Clima Aw – Honduras/ Tegucigalpa

Tabela 28 – Resultados das simulações para diferentes orientações da casa referência.

Orientação da fachada da frente	Consumo anual total (kWh/m²ano)	Desconforto anual (horas)
0°	110,01	78,81
90°	117,38	37,24
180°	108,62	46,79
270°	117,14	15,68

De acordo com as simulações efetuadas (Tabela 28), optou-se por orientar a casa a 180°, ou seja, a fachada principal da casa encontra-se virada para Norte.

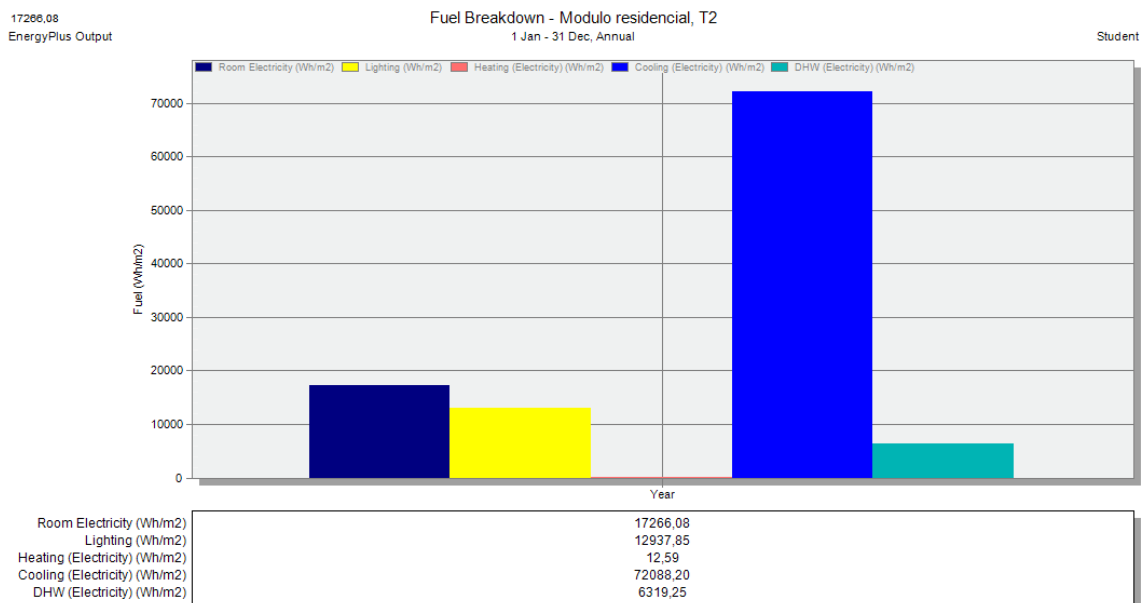


Figura 68 – Consumo energético anual desagregado na casa com climatização no clima Aw.

Na casa de referência para o clima de savana tropical (Aw), tem-se que a necessidade de aquecimento mais uma vez é quase nula, enquanto a necessidade de arrefecimento bastante elevada. A energia total consumida é de 108,62 kWh/(m²ano), sendo a energia primária total consumida de 282,42 kWh/m²ano, aplicando um fator de energia primária de 2,6.

De acordo com a Figura 69 a temperatura operativa média é de 24,85 °C e a temperatura média no interior da casa é de 23,84°C. O número de horas de desconforto anuais também desceu drasticamente passando de 3314,92 horas para 46,79 horas.

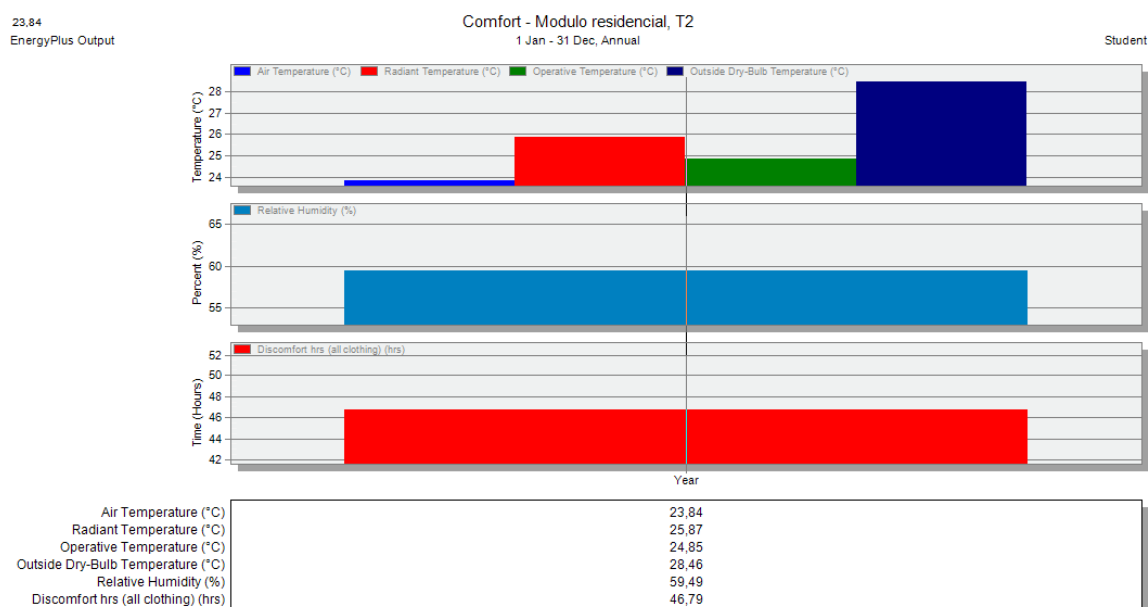


Figura 69 - Médias anuais da temperatura do ar, da humidade relativa e das horas de desconforto no interior da casa com climatização para o clima Aw.

Com a implementação do sistema de climatização conseguiu-se atingir temperaturas de conforto durante todo o ano, para todos os compartimentos da casa, exceto para a WC. No entanto, uma vez que a ocupação desta é pouco significativa, e as temperaturas não encontra-se muito longe dos 26°C requisitados, optou-se por não tentar alcançar no mínimo esta temperatura de modo a evitar um maior consumo energético.

Tabela 29 - Médias mensais da temperatura ambiente (T. A.), da temperatura operativa (T. Op.) e da humidade relativa (HR) no interior da casa modular com climatização para o clima Aw.

Data (2002)	Geral		Quarto 1 – Norte/Este		Quarto 2 – Sul/ Este			Sala e Cozinha – Norte/Sul/Oeste			WC - Sul		
	T. A. (°C)	T. A. (°C)	T. Op. (°C)	HR	T. A. (°C)	T. Op. (°C)	HR	T. A. (°C)	T. Op. (°C)	HR	T. A. (°C)	T. Op. (°C)	HR
01-01	23,93	24,15	25,11	55,88	23,61	25,12	55,57	23,49	24,49	59,70	27,25	27,89	51,90
01-02	23,89	24,04	25,09	54,55	23,63	24,99	54,70	23,54	24,61	58,37	26,60	27,18	52,25
01-03	23,77	24,02	25,14	54,66	23,73	24,94	55,17	23,41	24,54	59,69	25,91	26,43	55,28
01-04	23,80	23,98	25,20	54,58	23,74	24,99	55,27	23,45	24,63	59,59	25,97	26,47	56,07
01-05	23,88	23,98	25,19	56,15	23,77	24,96	56,99	23,59	24,71	61,80	25,87	26,35	60,17
01-06	23,79	24,04	25,17	56,76	23,84	24,92	57,77	23,45	24,51	62,67	25,51	25,97	62,28
01-07	23,85	24,01	25,15	56,27	23,80	24,90	57,28	23,58	24,61	61,59	25,46	25,92	60,52
01-08	23,82	24,08	25,13	57,36	23,84	24,90	58,13	23,52	24,50	63,68	25,41	25,86	63,31
01-09	23,78	24,14	25,09	57,75	23,87	24,87	58,26	23,45	24,36	63,74	25,17	25,62	62,63
01-10	23,85	24,13	25,05	57,59	23,83	24,88	57,63	23,55	24,45	63,43	25,49	25,96	60,09
01-11	23,82	24,11	24,96	57,92	23,64	24,90	57,21	23,43	24,32	62,83	26,27	26,82	57,49
01-12	23,90	24,17	25,07	56,39	23,61	25,15	55,91	23,39	24,37	60,81	27,47	28,12	52,85

c) Clima BSk – Irão/ Teerão

Tabela 30 – Resultados das simulações para diferentes orientações da casa referência.

Orientação da fachada da frente	Consumo anual total (kWh/m²ano)	Desconforto anual (horas)
0°	66,04	10,81
90°	73,28	9,68
180°	67,00	11,25
270°	71,95	16,17

De acordo com as simulações efetuadas (Tabela 30), optou-se por orientar a casa a 0°, ou seja, a fachada principal da casa encontra-se virada para Sul.

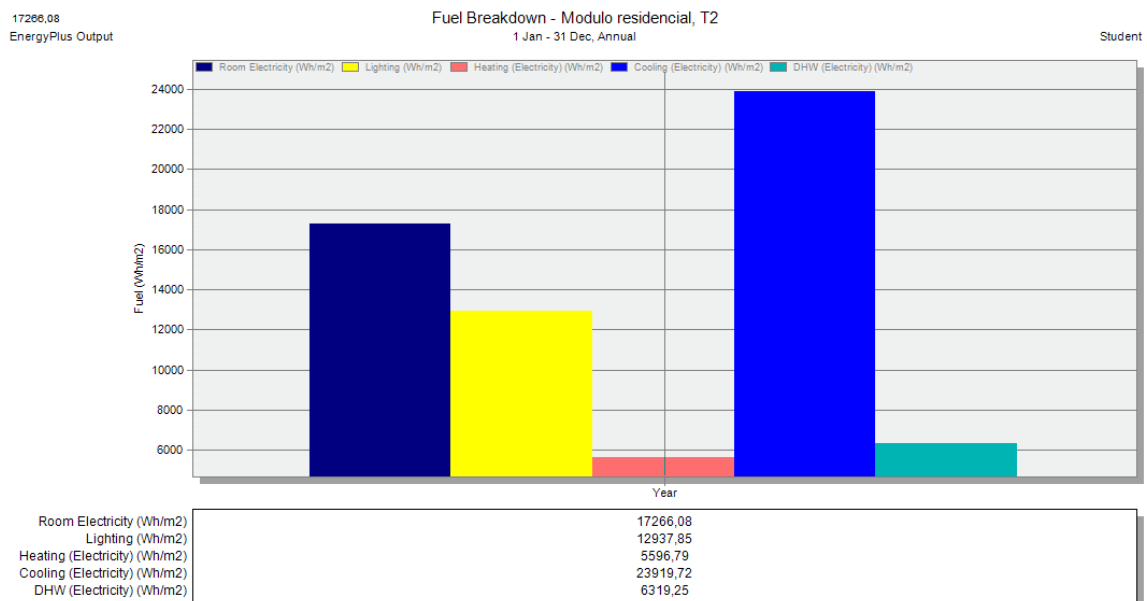


Figura 70 - Consumo energético anual desagregado na casa com climatização no clima BSk.

Para o clima semiárido frio (BSk) a necessidade de aquecimento existe mas é baixa, sendo a necessidade de arrefecimento mais alta. A energia total consumida é de 66,04 kWh/(m²ano), sendo a energia primária total consumida de 171,71 kWh/m²ano, aplicando um fator de energia primária de 2,6.

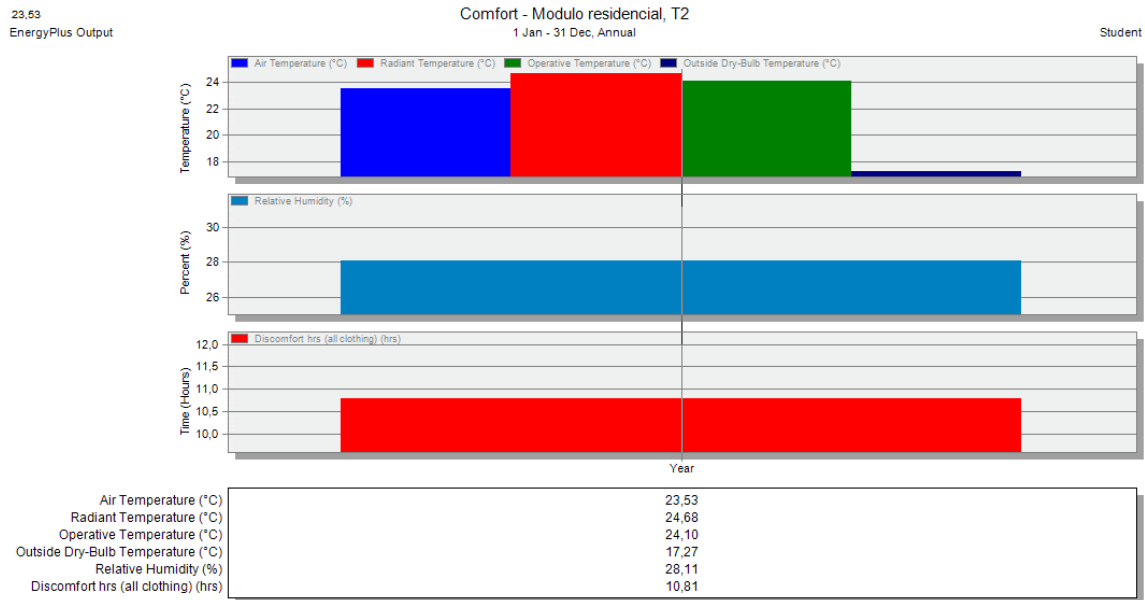


Figura 71 - Médias anuais da temperatura do ar, da humidade relativa e das horas de desconforto no interior da casa com climatização para o clima BSk.

Como se observa na Figura 71 e na Tabela 31 a implementação do sistema de climatização contribuiu bastante para que temperaturas de conforto fossem atingidas durante todo o ano, para todos os compartimentos da casa, exceto para a WC nos meses de verão.

A temperatura operativa média é de 24,10°C e a temperatura média no interior da casa é de 23,53°C. O número de horas de desconforto anuais também desceu drasticamente passando de 2916,19 horas para 10,81 horas.

Tabela 31 - Médias mensais da temperatura ambiente (T. A.), da temperatura operativa (T. Op.) e da humidade relativa (HR) no interior da casa modular com climatização para o clima BSk.

Data (2002)	Geral		Quarto 1 – Sul/Oeste		Quarto 2 – Norte/Oeste			Sala e Cozinha – Norte/Sul/Este			WC – Norte		
	T. A. (°C)	T. A. (°C)	T. Op. (°C)	HR	T. A. (°C)	T. Op. (°C)	HR	T. A. (°C)	T. Op. (°C)	HR	T. A. (°C)	T. Op. (°C)	HR
01-01	21,94	24,23	24,26	22,41	21,66	21,22	25,30	21,63	21,59	22,39	20,13	19,96	23,82
01-02	22,13	24,29	24,44	21,29	22,05	21,75	23,87	21,73	21,88	21,96	20,74	20,64	22,97
01-03	22,82	24,47	24,77	25,33	23,29	23,29	26,89	22,27	22,68	25,89	22,43	22,50	25,13
01-04	23,52	24,54	24,95	26,40	24,30	24,63	26,72	22,94	23,48	26,65	23,97	24,19	24,58
01-05	24,20	24,79	25,51	29,45	24,76	25,51	29,41	23,69	24,52	30,09	25,42	25,81	26,70
01-06	24,62	24,70	25,81	29,20	24,59	25,81	29,34	24,27	25,42	28,87	26,91	27,44	24,08
01-07	24,79	24,65	25,84	36,52	24,59	25,84	36,59	24,56	25,70	35,46	27,10	27,62	29,92
01-08	24,74	24,64	25,84	36,63	24,66	25,82	36,59	24,48	25,66	35,46	26,94	27,41	30,18
01-09	24,50	24,67	25,82	29,70	24,88	25,67	29,45	24,15	25,24	30,75	25,89	26,26	27,07
01-10	23,85	24,64	25,50	27,41	24,35	24,59	28,50	23,46	24,22	27,37	23,95	24,11	26,22
01-11	23,03	24,38	25,17	26,31	23,09	22,99	28,59	22,74	23,37	26,76	22,19	22,20	27,51
01-12	22,12	24,22	24,34	24,22	21,79	21,40	27,49	21,86	21,90	25,37	20,47	20,31	26,79

d) Clima Am – Suriname/ Zanderij

Tabela 32 – Resultados das simulações para diferentes orientações da casa referência.

Orientação da fachada da frente	Consumo anual total (kWh/m²ano)	Desconforto anual (horas)
0°	109,93	14,85
90°	117,33	8,64
180°	109,70	25,81
270°	117,32	12,29

Relativamente ao clima de monção tropical, Am, optou-se por orientar a casa a 180°, ou seja, a fachada principal da casa encontra-se virada para Norte.

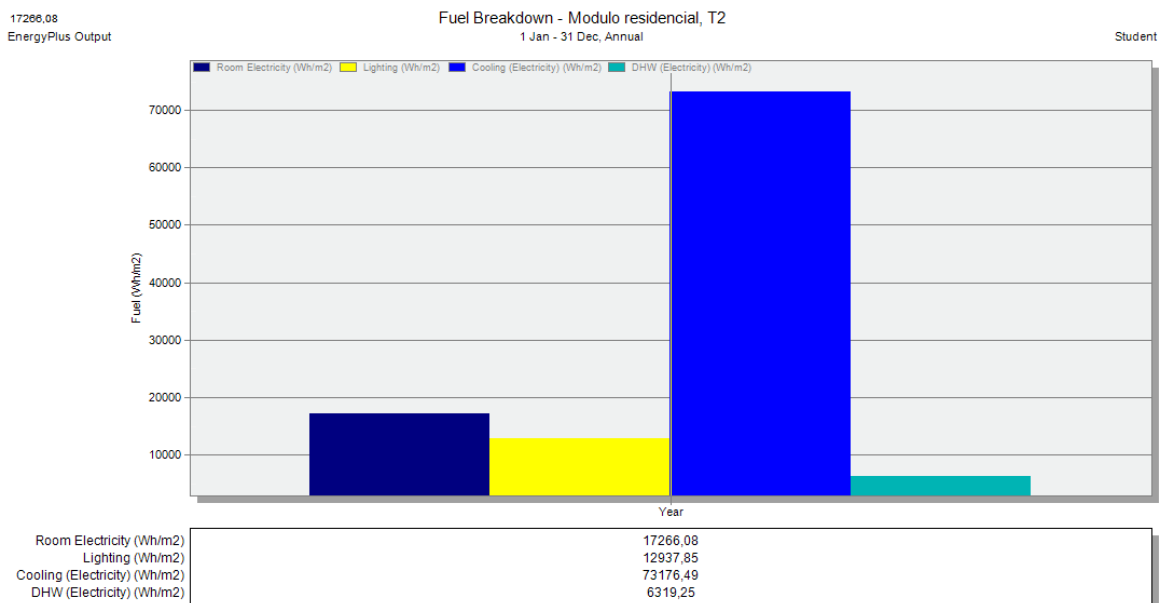


Figura 72 - Consumo energético anual desagregado na casa com climatização no clima Am.

Tal como no clima de savana tropical (Aw) a casa de referência para o clima de monção tropical (Am), tem uma necessidade de aquecimento quase nula, enquanto a necessidade de arrefecimento é bastante elevada. A energia total consumida é de 109,70 kWh/(m²ano), sendo a energia primária total consumida de 285,22 kWh/(m²ano), aplicando um fator de energia primária de 2,6.

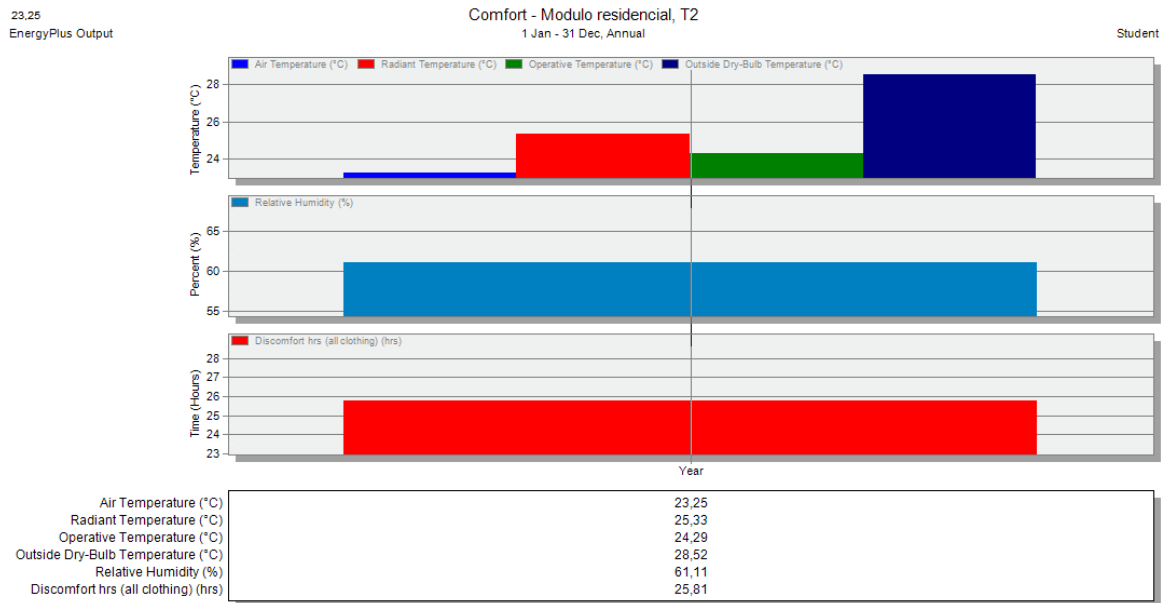


Figura 73 - Médias anuais da temperatura do ar, da humidade relativa e das horas de desconforto no interior da casa com climatização para o clima Am.

O comportamento térmico da casa de referência para o clima Am foi muito semelhante ao comportamento da casa para o clima Aw. Neste caso, a temperatura operativa média é de 24,29°C e a temperatura média no interior da casa é de 23,25°C. O número de horas de desconforto anuais também desceu drasticamente passando de 3314,92 horas para 25,81 horas.

Também neste clima não se atingiu temperaturas de conforto no WC para a maior parte do ano, como se pode observar na Tabela 33.

Tabela 33 - Médias mensais da temperatura ambiente (T. A.), da temperatura operativa (T. Op.) e da humidade relativa (HR) no interior da casa modular com climatização para o clima Am.

Data (2002)	Geral		Quarto 1 – Norte/Este		Quarto 2 – Sul/ Este			Sala e Cozinha – Norte/Sul/Oeste			WC - Sul		
	T. A. (°C)	T. A. (°C)	T. Op. (°C)	HR	T. A. (°C)	T. Op. (°C)	HR	T. A. (°C)	T. Op. (°C)	HR	T. A. (°C)	T. Op. (°C)	HR
01-01	23,28	24,14	25,08	56,18	24,01	25,16	55,47	22,37	23,43	62,72	26,54	26,97	56,50
01-02	23,27	24,03	25,08	54,98	23,97	25,11	54,70	22,38	23,54	62,32	26,54	26,95	56,53
01-03	23,23	24,05	25,09	54,88	24,03	25,11	54,82	22,34	23,48	62,50	26,27	26,64	57,05
01-04	23,25	24,05	25,07	56,08	24,07	25,09	56,20	22,38	23,48	63,66	26,15	26,49	59,60
01-05	23,29	24,06	25,10	56,45	24,12	25,10	56,93	22,45	23,54	64,77	26,02	26,35	62,46
01-06	23,21	24,06	25,07	57,06	24,14	25,05	57,73	22,32	23,39	66,10	25,79	26,11	64,19
01-07	23,24	24,04	25,07	57,02	24,12	25,05	57,70	22,38	23,46	65,58	25,84	26,18	64,01
01-08	23,21	24,03	25,10	56,50	24,07	25,10	56,84	22,32	23,46	65,33	26,12	26,48	62,48
01-09	23,24	24,00	25,12	55,69	24,00	25,14	55,70	22,33	23,53	64,22	26,49	26,86	59,94
01-10	23,27	24,04	25,11	56,08	24,00	25,14	55,90	22,37	23,54	64,61	26,58	26,98	60,45
01-11	23,29	24,07	25,11	56,07	23,97	25,17	55,67	22,36	23,52	64,39	26,86	27,29	59,21
01-12	23,26	24,10	25,10	55,64	23,93	25,19	55,13	22,30	23,43	63,49	26,93	27,39	56,84

e) Clima Dfb – Estónia/ Tallinn

Tabela 34 – Resultados das simulações para diferentes orientações da casa referência.

Orientação da fachada da frente	Consumo anual total (kWh/m²ano)	Desconforto anual (horas)
0°	64,78	90,39
90°	65,72	90,00
180°	65,39	90,38
270°	65,56	89,65

De acordo com as simulações efetuadas (Tabela 34), optou-se por orientar a casa a 0°, ou seja, a fachada principal da casa encontra-se virada para Sul.

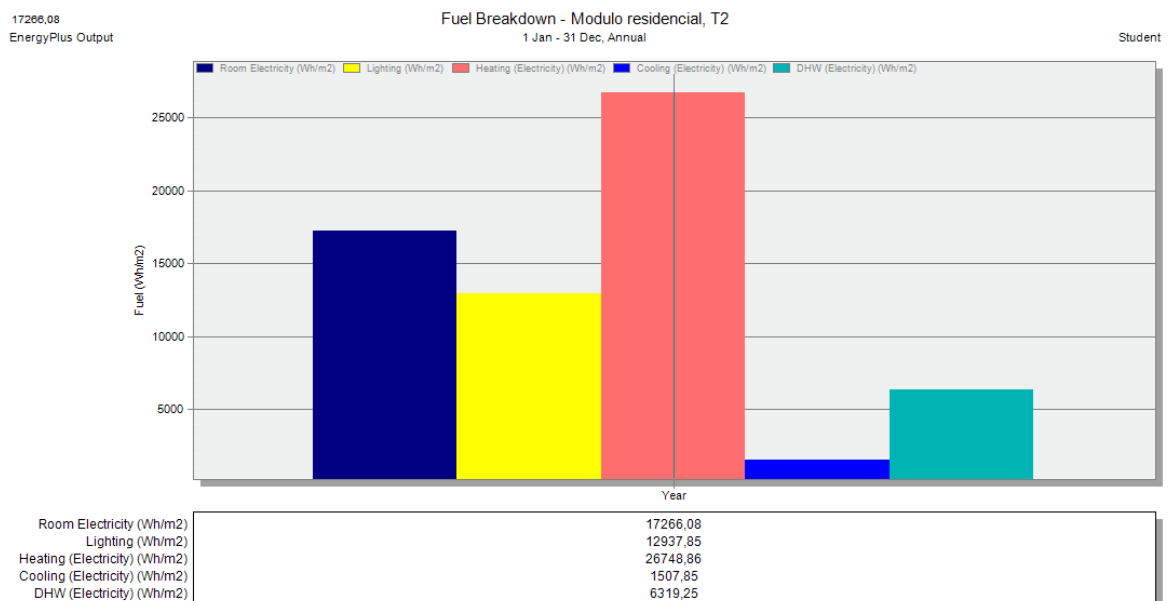


Figura 74 - Consumo energético anual desagregado na casa com climatização no clima Dfb.

Para o clima continental de verão quente (Dfb) a necessidade de aquecimento é mais alta, sendo a necessidade de arrefecimento muito baixa. A energia total consumida é de 64,78 kWh/(m²ano), sendo a energia primária total consumida de 129,56 kWh/(m²ano), aplicando um fator de energia primária de 2,0.

Na Figura 75 verifica-se que temperatura operativa média é de 21,27 °C e a temperatura média no interior da casa é de 21,56°C. O número de horas de desconforto anuais também desceu drasticamente passando de 3023,71 horas para 90,39 horas.

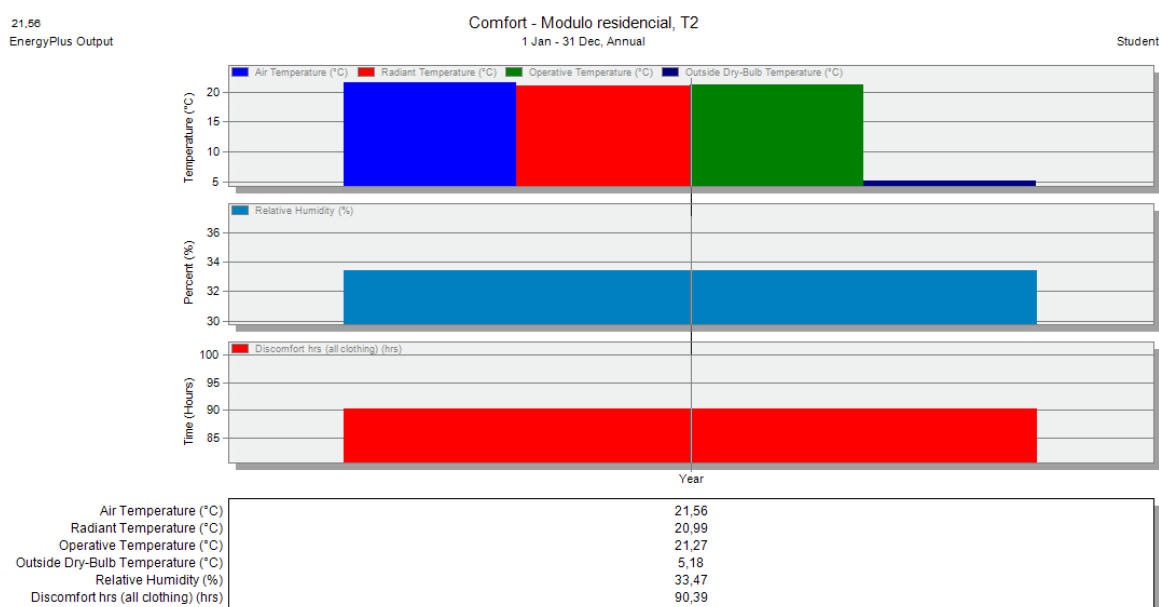


Figura 75 - Médias anuais da temperatura do ar, da humidade relativa e das horas de desconforto no interior da casa com climatização para o clima Dfb.

A implementação do sistema de climatização na casa de referência para o clima Dfb contribuiu bastante para que temperaturas de conforto fossem atingidas durante todo o ano, para todos os compartimentos da casa, exceto para a WC nos meses de inverno (temperaturas a vermelho). No entanto, uma vez que a ocupação desta é pouco significativa, e as temperaturas não encontra-se muito longe dos 20°C requisitados, não se tentou alcançar no mínimo esta temperatura de modo a evitar um maior consumo energético.

Tabela 35 - Médias mensais da temperatura ambiente (T. A.), da temperatura operativa (T. Op.) e da humidade relativa (HR) no interior da casa modular com climatização para o clima Dfb.

Data (2002)	Geral		Quarto 1 – Sul/Oeste		Quarto 2 – Norte/Oeste			Sala e Cozinha – Norte/Sul/Este			WC – Norte		
	T. A. (°C)	T. A. (°C)	T. Op. (°C)	HR	T. A. (°C)	T. Op. (°C)	HR	T. A. (°C)	T. Op. (°C)	HR	T. A. (°C)	T. Op. (°C)	HR
01-01	20,72	21,02	19,93	24,16	21,10	19,84	24,10	20,97	19,74	21,55	17,60	17,15	24,32
01-02	20,73	21,58	20,81	20,22	21,01	19,81	20,69	20,87	19,88	18,57	17,50	17,08	21,06
01-03	20,74	21,72	21,25	24,73	20,73	19,96	25,92	20,76	20,15	23,80	18,69	18,40	25,96
01-04	20,96	22,48	22,46	27,78	21,23	20,96	29,59	20,59	20,57	28,34	20,02	19,95	28,84
01-05	22,05	23,58	23,96	31,19	22,75	22,89	32,34	21,44	21,92	32,44	21,82	22,01	30,56
01-06	23,06	24,17	24,74	42,30	23,88	24,28	42,86	22,50	23,12	43,68	23,11	23,44	40,71
01-07	23,60	24,58	25,25	46,82	24,13	24,86	47,21	23,08	23,75	47,65	23,61	23,96	44,84
01-08	23,05	24,16	24,67	51,54	23,51	23,76	53,28	22,63	23,14	53,55	22,85	23,07	51,48
01-09	21,47	22,85	22,90	43,05	21,71	21,53	45,59	21,09	21,19	45,18	20,88	20,83	45,14
01-10	20,70	21,62	21,24	36,97	20,78	20,23	38,49	20,59	20,15	36,70	19,51	19,27	38,46
01-11	20,70	20,99	19,97	26,61	20,98	19,86	26,66	20,91	19,78	24,71	18,09	17,67	27,56
01-12	20,81	21,05	19,83	23,61	21,09	19,82	23,56	21,11	19,81	21,62	17,72	17,27	24,55

5.6. Estudo paramétrico

De modo a tentar perceber os efeitos de alguns parâmetros no consumo energético da casa modular, especialmente ao nível da necessidade de aquecimento e de arrefecimento, foi feito um estudo paramétrico que possibilitou a tomada de decisão relativamente a quais as melhores soluções a implementar de modo a conseguir-se o menor consumo energético possível.

Tabela 36 – Parâmetros analisados no estudo paramétrico.

Parâmetros		Valores estipulados	
Coeficiente de transferência de calor	U _{baixo}	Parede externa	0,150 W/m ² k
		Parede interior	0,200 W/m ² k
		Pavimento	0,150 W/m ² k
		Cobertura	0,125 W/m ² k
	U _{alto}	Parede externa	0,450 W/m ² k
		Parede interior	0,500 W/m ² k
		Pavimento	0,450 W/m ² k
		Cobertura	0,425 W/m ² k
Percentagem de envidraçado	%V _{baixa}	15%	
	%V _{alta}	46%	
Inércia térmica das paredes internas	I _{baixa}	7,10 kJ m ⁻² K ⁻¹ s ^{-1/2}	
	I _{alta}	4190 kJ m ⁻² K ⁻¹ s ^{-1/2}	
Refletividade da camada exterior da cobertura	R _{baixo}	Absortância térmica (emissividade)	0,090
		Absortância solar	0,950
		Absortância visível	1,000
		Cor	Preto
	R _{alto}	Absortância térmica (emissividade)	0,090
		Absortância solar	0,150
		Absortância visível	0,001
		Cor	Branco

Os parâmetros analisados encontram-se discriminados na Tabela 36 e o comportamento dos mesmos consoante o tipo de clima é estudado nos pontos seguintes. A metodologia seguida consistiu em, para cada parâmetro que fosse trabalhado, manteve-se os restantes parâmetros inalterados como no caso de referência, especificado no ponto 4.3 do capítulo 4.

a) Clima BSh – Senegal/ Dakar

Nas figuras seguintes são apresentados os resultados obtidos no estudo paramétrico para o clima semiárido quente (BSh), cujo país representante é o Senegal e a cidade Dakar, a capital.

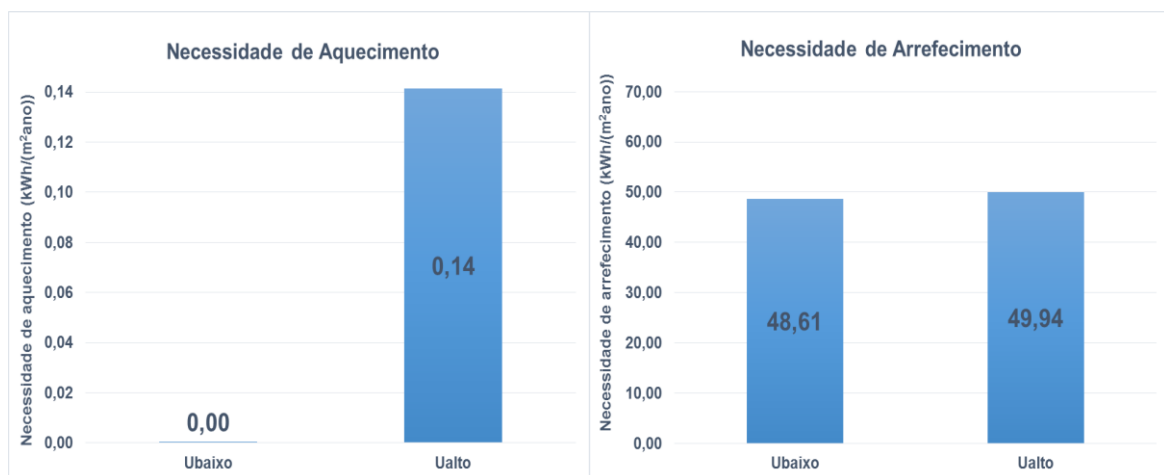


Figura 76 – Efeito do coeficiente de transferência de calor (U) na necessidade de aquecimento (à esquerda) e de arrefecimento (à direita) para o clima BSh.

Na Figura 76 observa-se que para o clima BSh, nomeadamente no Senegal, ao nível das necessidades de aquecimento, um coeficiente de transferência de calor mais baixo ($0,15 \text{ W/(m}^2\text{K)}$) é mais eficiente. O mesmo acontece para a necessidade de arrefecimento.

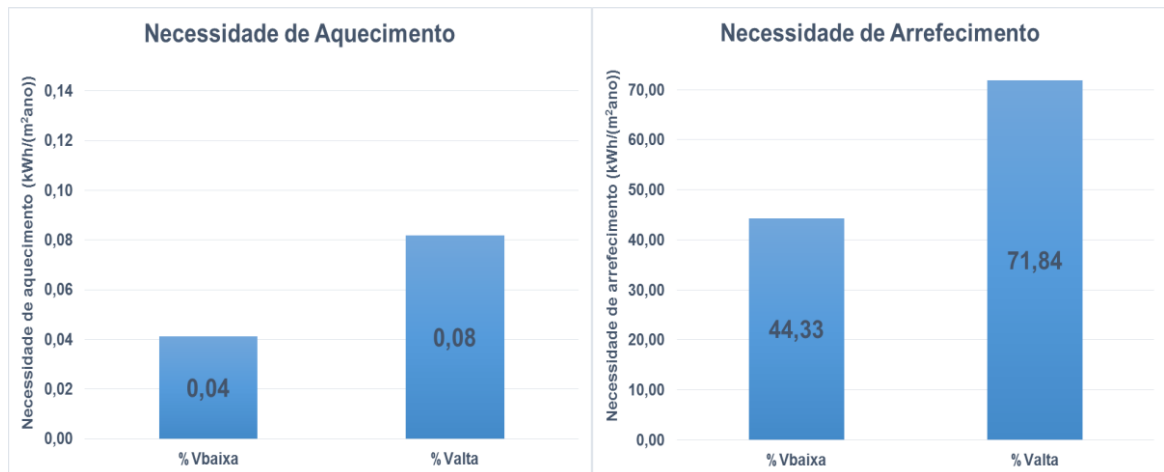


Figura 77 - Efeito da percentagem de envidraçado da envolvente da casa modular na necessidade de aquecimento (à esquerda) e de arrefecimento (à direita) para o clima BSh.

Relativamente à influência da percentagem de envidraçado (Figura 77) esta é pouco significativa relativamente à necessidade de aquecimento. No entanto, relativamente à necessidade de arrefecimento, o efeito é significativo, sendo mais eficaz uma percentagem de envidraçado baixa.

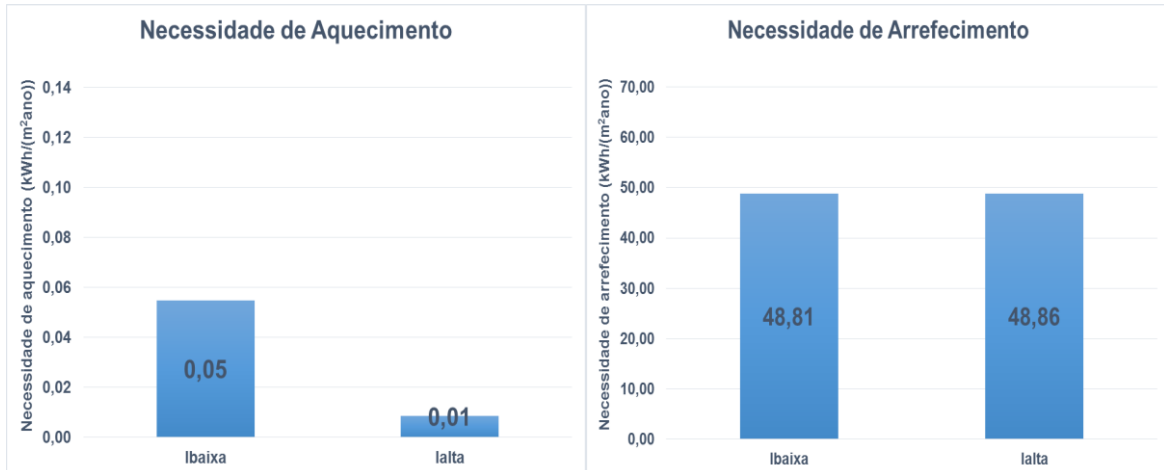


Figura 78 - Efeito da inércia das paredes internas da casa modular na necessidade de aquecimento (à esquerda) e de arrefecimento (à direita) para o clima BSh.

Na Figura 78 observa-se que a influência da inércia térmica das paredes interiores é pouco significativa tanto nas necessidades de aquecimento como nas de arrefecimento, sendo no entanto preferível para este tipo de clima uma inércia térmica alta, tendo um efeito mais positivo ao nível do conforto como é possível observar na tabela dos resultados do estudo térmico do clima BSh no Anexo III.

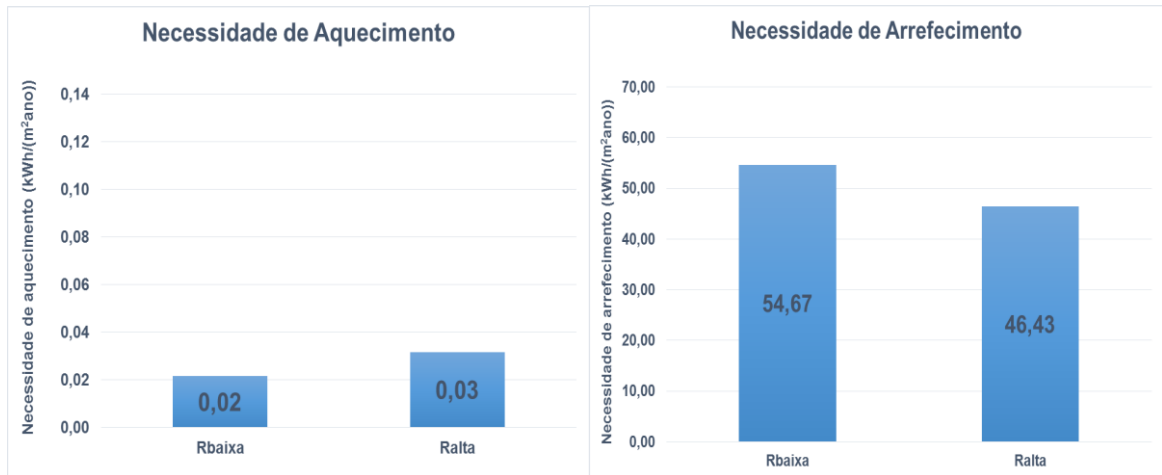


Figura 79 - Efeito da refletividade da camada exterior da cobertura da casa modular na necessidade de aquecimento (à esquerda) e de arrefecimento (à direita) para o clima BSh.

Relativamente ao efeito da refletividade da camada exterior da cobertura, representado na Figura 79, mostra que é mais eficaz uma cobertura com refletividade alta contribuindo para a diminuição das necessidades de arrefecimento que são elevadas.

b) Clima Aw – Honduras/ Tegucigalpa

Nas figuras seguintes são apresentados os resultados do estudo paramétrico para o clima de savana tropical ou Aw, especificamente para as Honduras e a cidade de Tegucigalpa, onde as necessidades de aquecimento são praticamente nulas ao longo de todo o ano.

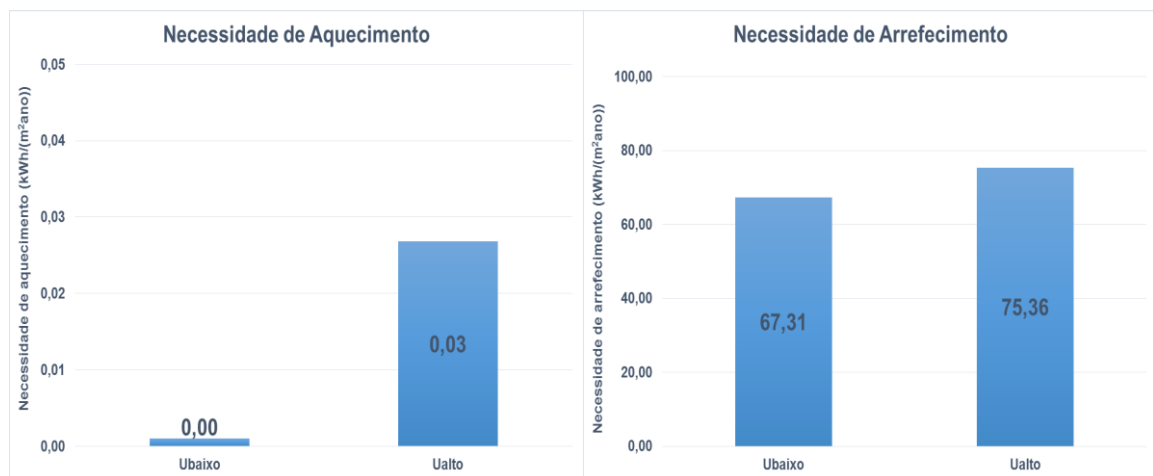


Figura 80 - Efeito do coeficiente de transferência de calor (U) na necessidade de aquecimento (à esquerda) e de arrefecimento (à direita) para o clima Aw.

Como se pode observar na Figura 80, um coeficiente de transferência de calor baixo é mais eficiente no que diz respeito à diminuição do consumo energético na necessidade de arrefecimento.

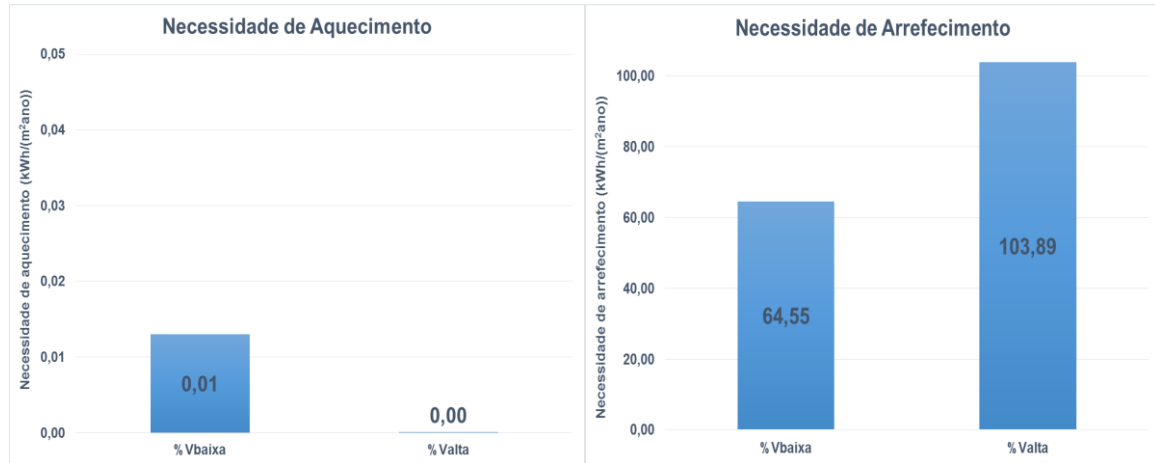


Figura 81 - Efeito da percentagem de envidraçado da envolvente da casa modular na necessidade de aquecimento (à esquerda) e de arrefecimento (à direita) para o clima Aw.

Relativamente à percentagem de envidraçado (Figura 81), de acordo com o estudo efetuado, é mais eficiente colocar uma percentagem baixa, sendo a diferença no consumo bastante significativa.

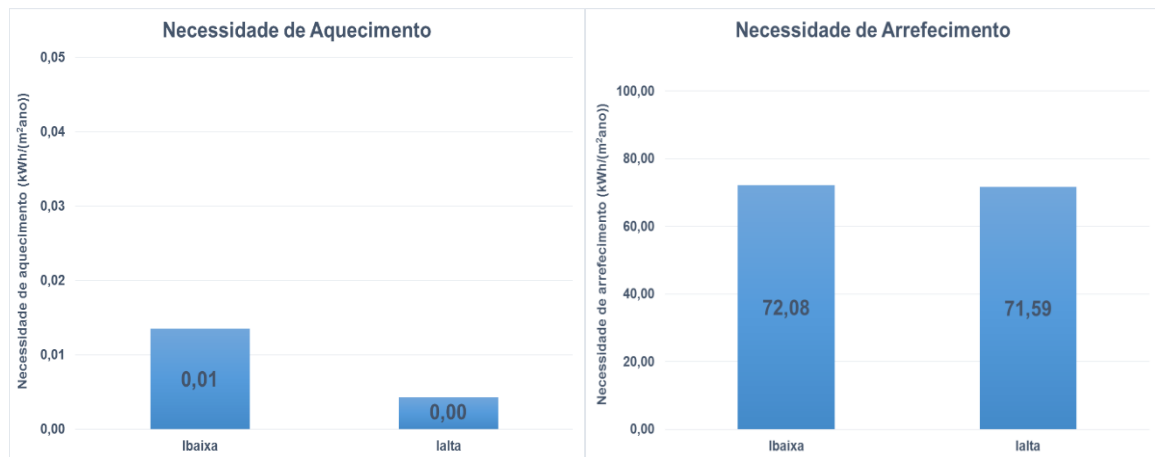


Figura 82 - Efeito da inércia das paredes internas da casa modular na necessidade de aquecimento (à esquerda) e de arrefecimento (à direita) para o clima Aw.

De acordo com a Figura 82, mais uma vez, o efeito da inércia térmica das paredes interiores na necessidade de arrefecimento parece ser pouco significativo, sendo no entanto preferível projetar paredes internas com inércia alta.

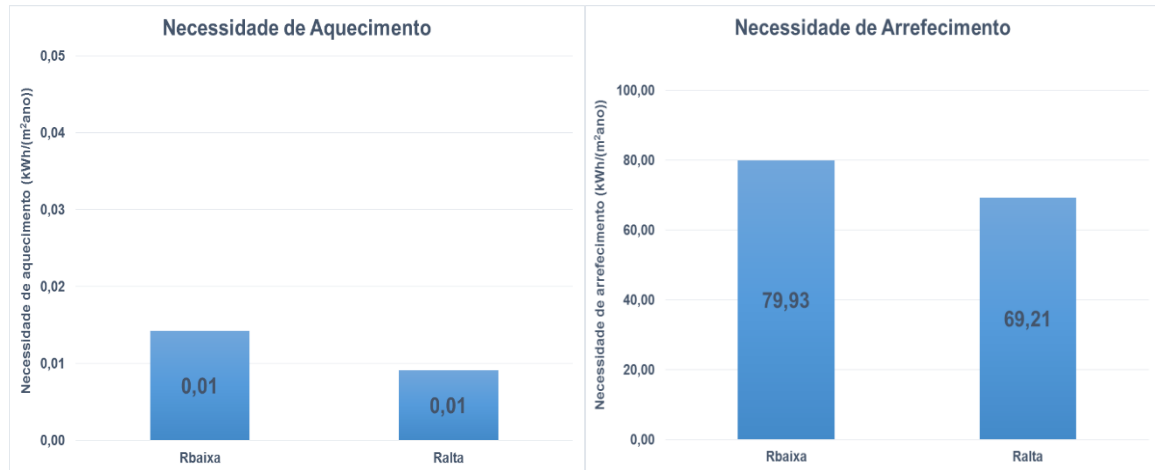


Figura 83 - Efeito da refletividade da camada exterior da cobertura da casa modular na necessidade de aquecimento (à esquerda) e de arrefecimento (à direita) para o clima Aw.

Para o clima Aw, de acordo com a Figura 83, é mais eficiente ter uma cobertura com uma camada exterior com uma refletividade alta.

c) Clima BSk – Irão/ Teerão

Nas figuras seguintes, é possível observar os resultados do estudo paramétrico para o clima semiárido frio (BSK), cujo país representante é o Irão e a cidade, Teerão.

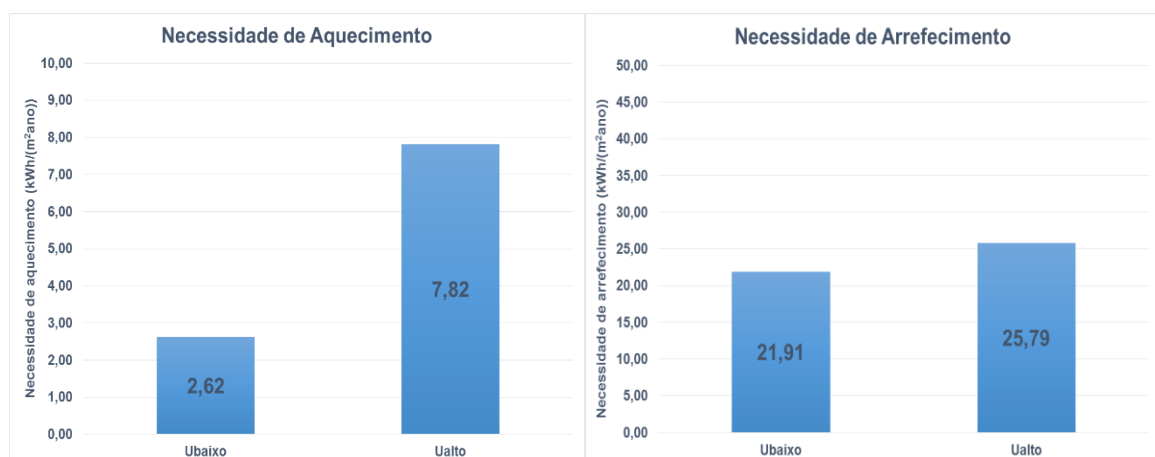


Figura 84 - Efeito do coeficiente de transferência de calor (U) na necessidade de aquecimento (à esquerda) e de arrefecimento (à direita) para o clima BSk.

Na Figura 84 observa-se que para o clima BSk, um coeficiente de transferência de calor mais baixo ($0,15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$), contribui para que o consumo energético seja inferior tanto nas necessidades de aquecimento como nas de arrefecimento.

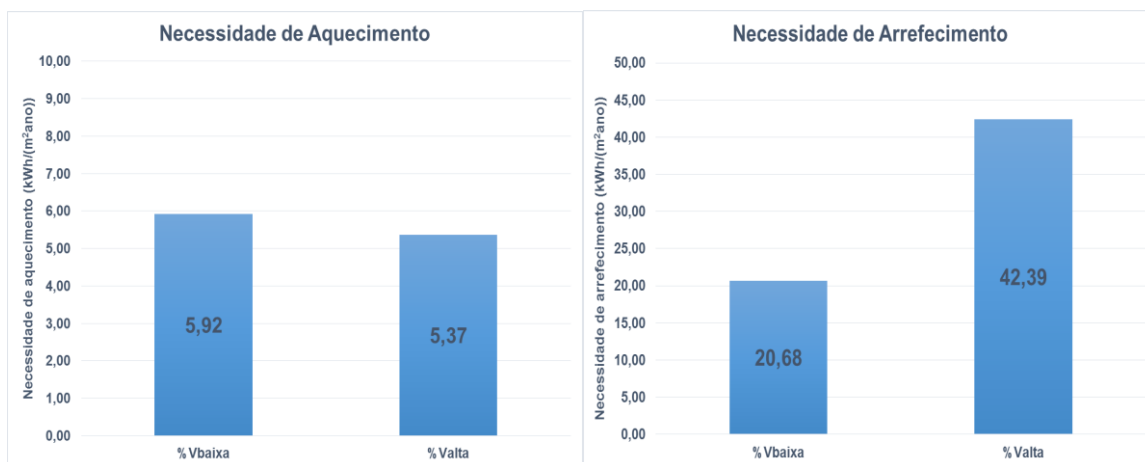


Figura 85 - Efeito da percentagem de envidraçado da envolvente da casa modular na necessidade de aquecimento (à esquerda) e de arrefecimento (à direita) para o clima BSk.

Na Figura 85 observa-se que para as necessidades de arrefecimento, é mais satisfatório adotar uma percentagem de envidraçado baixa, sendo a diferença de consumos bastante relevante, mais de metade.

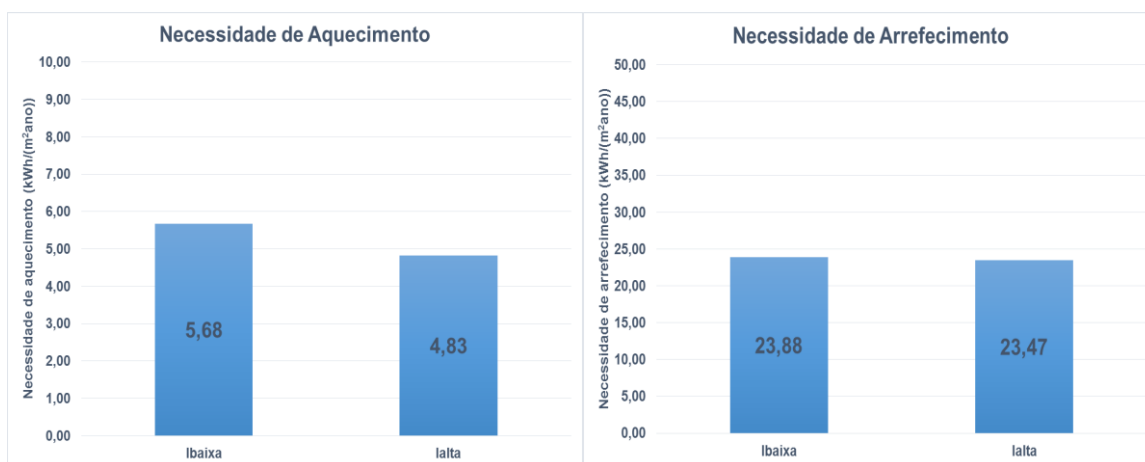


Figura 86 - Efeito da inércia das paredes internas da casa modular na necessidade de aquecimento (à esquerda) e de arrefecimento (à direita) para o clima BSk.

A Figura 86 faz referência aos resultados obtidos no estudo paramétrico relativamente à inércia térmica das paredes internas da casa modular. A diferença

no consumo energético é pouco significativa, tanto nas necessidades de aquecimento como nas necessidades de arrefecimento. Ainda assim, repara-se que existe um menor consumo nas duas situações para paredes internas com inércia alta, sendo também mais eficiente em termos de conforto térmico.

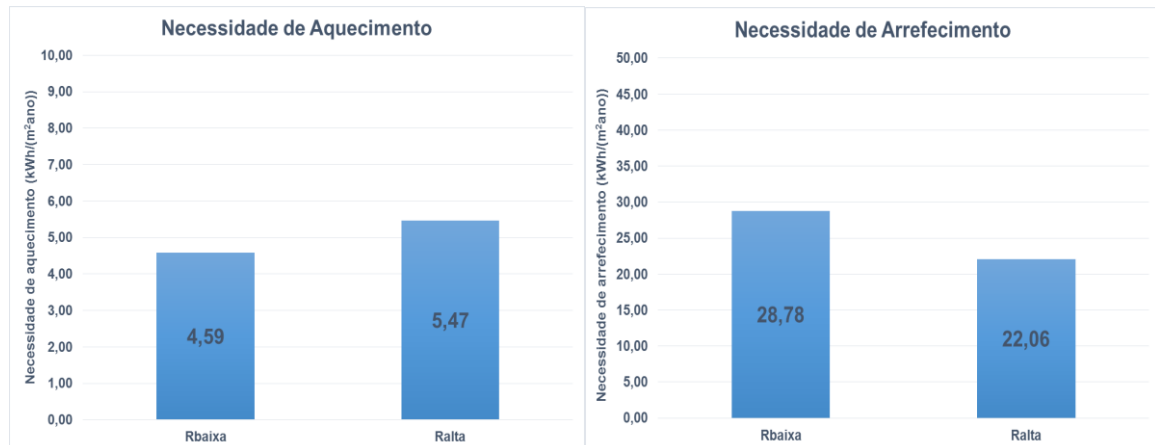


Figura 87 - Efeito da refletividade da camada exterior da cobertura da casa modular na necessidade de aquecimento (à esquerda) e de arrefecimento (à direita) para o clima BSk.

Na Figura 87, os resultados do estudo paramétrico apontam para um menor consumo energético na necessidade de aquecimento para uma cobertura com refletividade baixa e o contrário na necessidade de arrefecimento. No entanto, uma vez que as necessidades de arrefecimento são mais altas, é preferível optar por uma cobertura com uma camada exterior com refletividade alta.

d) Clima Am – Suriname/ Zanderij

Nas figuras seguintes, encontram-se os resultados do estudo paramétrico para o clima de monção tropical ou Am, cujo país representante é o Suriname e a cidade, Zanderij, onde as necessidades de aquecimento são nulas, sendo apresentados apenas os gráficos relativos às necessidades de arrefecimento.

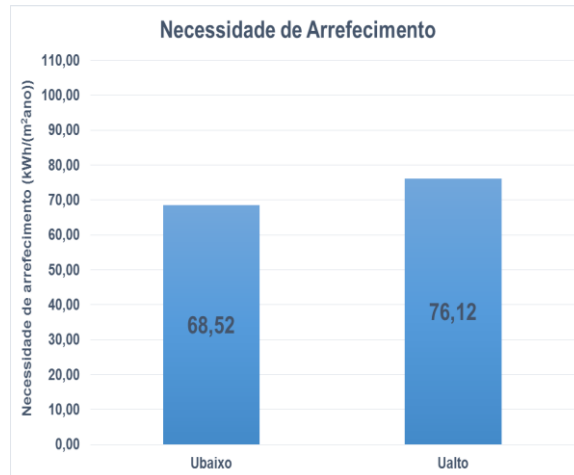


Figura 88 - Efeito do coeficiente de transferência de calor (U) na necessidade de arrefecimento para o clima Am.

Na Figura 88 observa-se que para o clima Am, ao nível das necessidades de arrefecimento, um coeficiente de transferência de calor mais baixo tem um efeito mais positivo no consumo energético, relativamente ao consumido quando o coeficiente de transferência de calor é mais alto ($U=0,45 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$).



Figura 89 - Efeito da percentagem de envidraçado da envolvente da casa modular na necessidade de arrefecimento para o clima Am.

Como se pode observar na Figura 89, para este clima o impacto no consumo energético de ter uma envolvente com uma percentagem de envidraçado elevada é bastante alto, sendo mais eficiente uma percentagem de envidraçado mais baixa.

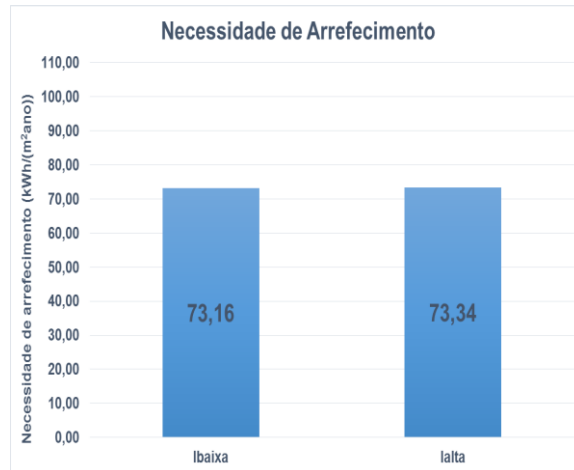


Figura 90 - Efeito da inércia das paredes internas da casa modular na necessidade de arrefecimento para o clima Am.

Mais uma vez denota-se (Figura 90) o baixo efeito da inércia das paredes internas da casa modular nas necessidades de arrefecimento, sendo a diferença dos valores obtidos pouco significativa. No entanto, pode-se ainda assim considerar como sendo mais eficiente a implementação de materiais nas paredes interiores com baixa inércia.

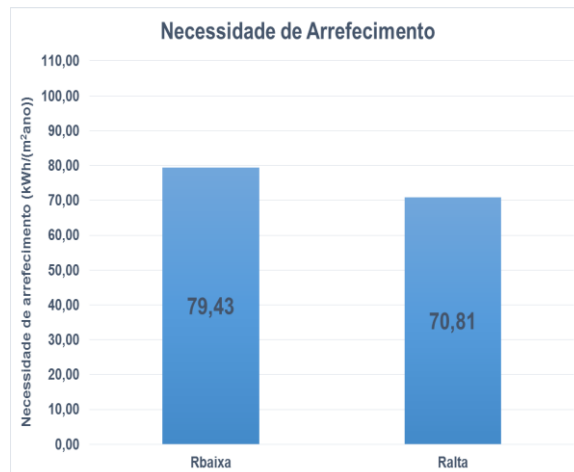


Figura 91 - Efeito da refletividade da camada exterior da cobertura da casa modular na necessidade de arrefecimento para o clima Am.

De acordo com a Figura 91, para o clima Am é bastante vantajoso em termos de diminuição do consumo energético, a implementação de uma cobertura cuja camada exterior tenha uma alta refletividade, entrando menos calor para o interior da casa.

e) Clima Dfb – Estónia/ Tallinn

Nas figuras seguintes, é possível observar os resultados do estudo paramétrico para o clima continental de verão quente ou Dfb, cujo país representante é a Estónia e a cidade, Tallinn.

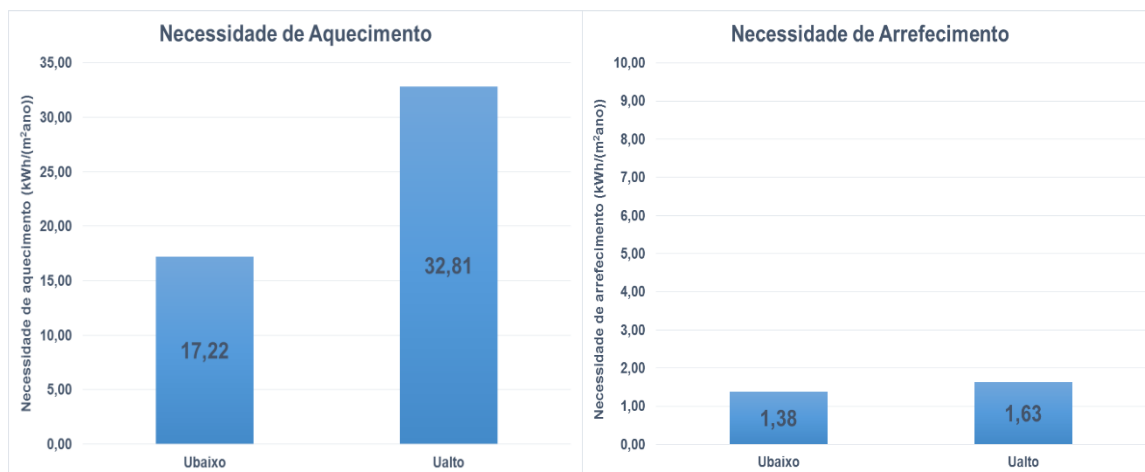


Figura 92 - Efeito do coeficiente de transferência de calor (U) na necessidade de aquecimento (à esquerda) e de arrefecimento (à direita) para o clima Dfb.

Na Figura 92 observa-se que para o clima Dfb, nomeadamente na Estónia, um coeficiente de transferência de calor mais baixo ($0,15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$), contribui para que o consumo energético seja inferior, tanto nas necessidades de aquecimento como nas de arrefecimento, sendo a diferença de consumos entre um coeficiente de transferência de calor baixo ($0,15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$) e alto ($0,45 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$) bastante significativa, nas necessidades de aquecimento, que são as mais elevadas neste clima.

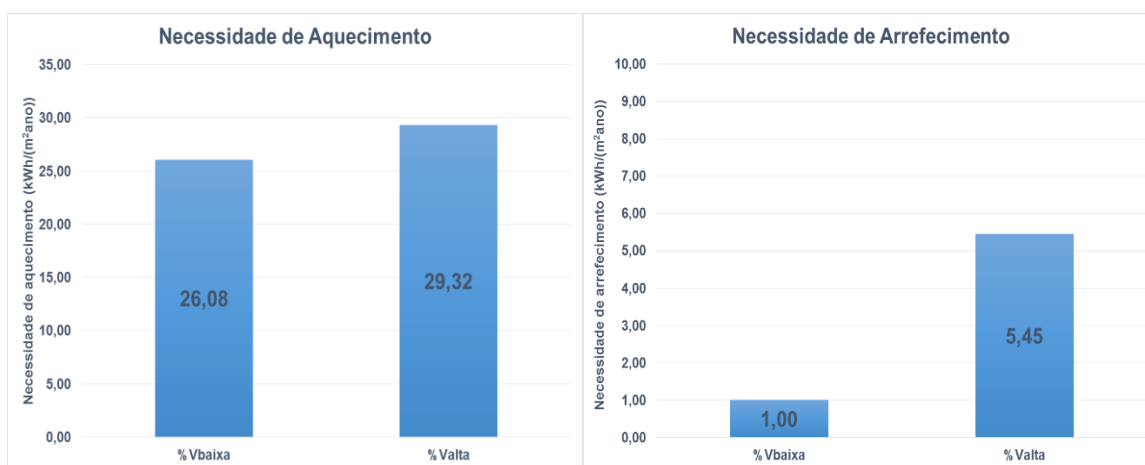


Figura 93 - Efeito da percentagem de envidraçado da envolvente da casa modular na necessidade de aquecimento (à esquerda) e de arrefecimento (à direita) para o clima Dfb.

No caso do efeito da percentagem de envidraçado da envolvente da casa modular, na Figura 93, tem-se que tanto na necessidade de aquecimento como de arrefecimento, é mais vantajoso adotar uma percentagem de envidraçado baixa.

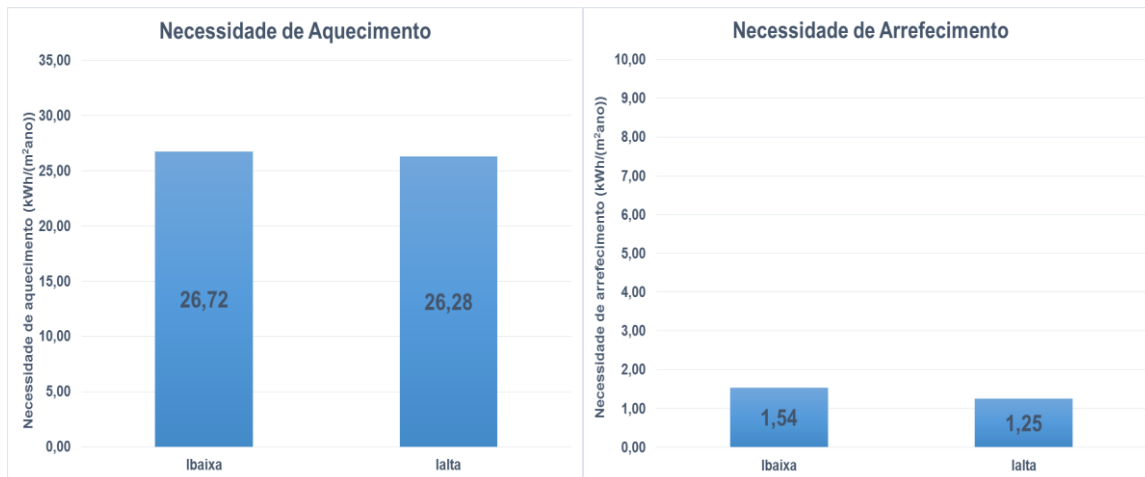


Figura 94 - Efeito da inércia das paredes internas da casa modular na necessidade de aquecimento (à esquerda) e de arrefecimento (à direita) para o clima Dfb.

Para o clima Dfb, o efeito da inércia das paredes internas (Figura 94) da casa modular na necessidade de aquecimento e de arrefecimento é pouco significativa. No entanto, para paredes internas com inércia térmica alta, o consumo energético é menor no caso das necessidades de aquecimento e de arrefecimento.

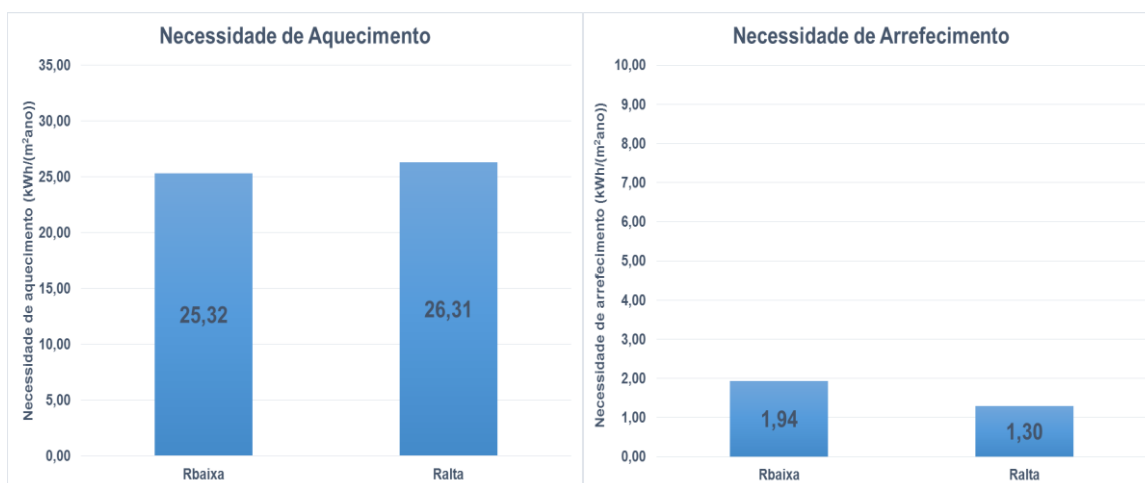


Figura 95 - Efeito da refletividade da camada exterior da cobertura da casa modular na necessidade de aquecimento (à esquerda) e de arrefecimento (à direita) para o clima Dfb.

Na Figura 95 observa-se que ao nível das necessidades de aquecimento e de arrefecimento, a diferença entre os valores obtidos para uma cobertura com

refletividade baixa ou alta é pouco significante, sendo no entanto mais eficiente adotar uma cobertura cuja camada exterior tenha uma refletividade baixa, aquecendo a casa.

5.7. Proposta base

O conceito da proposta base foi feito tendo em consideração os resultados obtidos no estudo paramétrico, ou seja, aplicando os parâmetros que contribuem para que o consumo energético global da casa modular diminua, sem comprometer o conforto.

a) Clima BSh – Senegal/ Dakar

Para o clima semiárido quente ou BSh chegou-se à conclusão que dentro das hipóteses estudadas a melhor solução a adotar seria:

- Coeficiente de transferência de calor baixo;
- Percentagem de envidraçados baixa;
- Inércia térmica das paredes interiores alta;
- Refletividade da camada exterior da cobertura elevada.

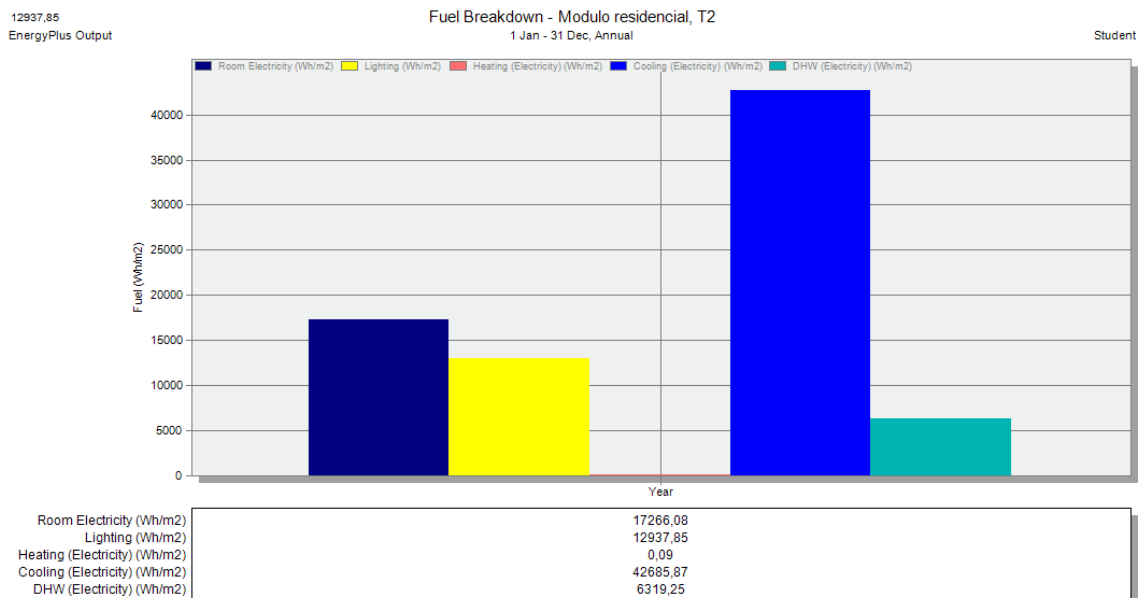


Figura 96 - Consumo energético total após aplicação das medidas resultantes da análise paramétrica para o clima BSh.

No consumo energético anual, da proposta base, tem-se que a energia total consumida é de 79,21 kWh/(m²ano), sendo a energia primária total consumida igual a 205,94 kWh/(m²ano), encontrando-se muito acima dos requisitos para uma casa passiva ao nível do consumo energético, em que as necessidades de arrefecimento e de aquecimento deverão ser inferiores a 15 kWh/(m²ano) e o total de energia primária consumida deverá ser inferior a 120 kWh/(m²ano).

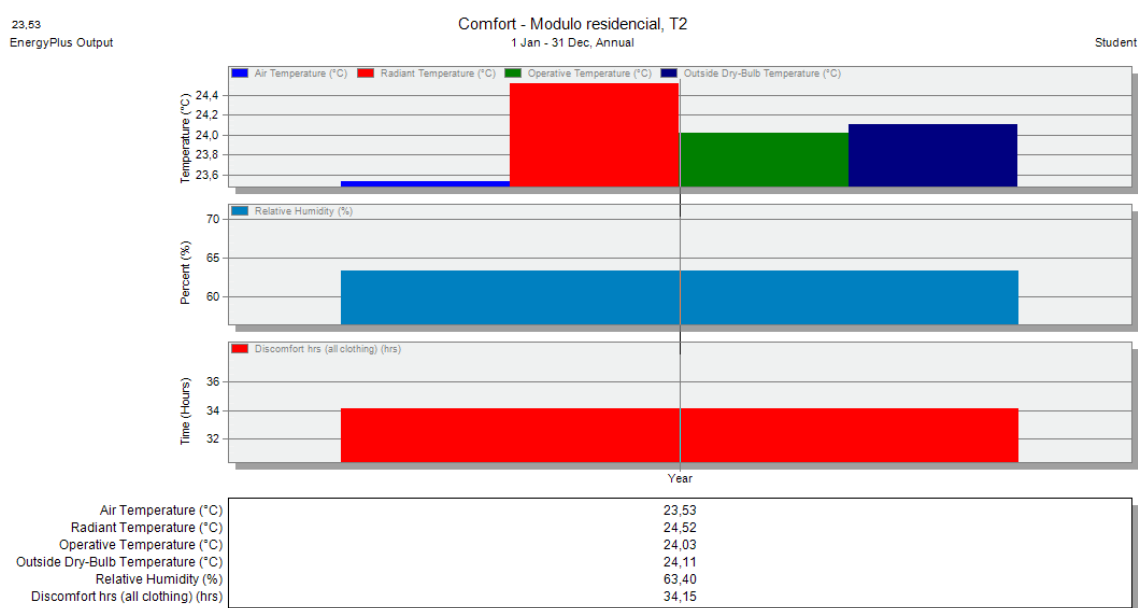


Figura 97 - Médias anuais de temperatura, humidade relativa e horas de conforto no interior da casa após aplicação das medidas resultantes da análise paramétrica para o clima BSh.

Relativamente ao conforto térmico, tem-se 34,15 horas de desconforto anuais na casa (inferior às 300 horas anuais de desconforto estipuladas). A média da temperatura operativa anual é de 24,03°C, sendo a média da temperatura do ar igual a 23,53°C, encontrando-se dentro do limite, ou seja, entre os 20°C e os 26°C. Com esta proposta consegue-se manter as temperaturas de conforto na casa durante todo o ano, incluindo o WC.

Tabela 37 - Médias mensais da temperatura ambiente (T. A.), da temperatura operativa (T. Op.) e da humidade relativa (HR) no interior da casa após aplicação das medidas resultantes da análise paramétrica para o clima BSh.

Data (2002)	Geral		Quarto 1 – Norte/Este		Quarto 2 – Sul/ Este			Sala e Cozinha – Norte/Sul/Oeste			WC - Sul		
	T. A. (°C)	T. A. (°C)	T. Op. (°C)	HR	T. A. (°C)	T. Op. (°C)	HR	T. A. (°C)	T. Op. (°C)	HR	T. A. (°C)	T. Op. (°C)	HR
01-01	23,28	23,44	23,77	55,18	23,98	24,43	52,96	22,93	23,37	54,90	24,09	24,49	48,47
01-02	23,17	23,33	23,66	57,85	23,66	24,05	56,36	22,92	23,36	58,18	23,63	23,99	53,65
01-03	23,14	23,41	23,74	61,18	23,50	23,84	60,72	22,94	23,40	61,14	23,33	23,66	58,60
01-04	23,17	23,48	23,81	63,49	23,49	23,82	63,48	22,97	23,45	63,04	23,35	23,66	61,38
01-05	23,43	23,70	24,11	65,91	23,64	24,05	66,26	23,23	23,77	64,52	23,85	24,14	64,46
01-06	23,60	23,89	24,35	67,37	23,82	24,27	67,75	23,35	23,96	65,36	24,39	24,64	66,48
01-07	23,81	24,02	24,51	67,95	23,98	24,47	68,10	23,55	24,19	65,52	24,89	25,12	66,94
01-08	23,84	23,99	24,46	72,08	24,00	24,49	71,99	23,58	24,21	68,06	25,04	25,23	70,99
01-09	23,85	24,01	24,49	70,72	24,08	24,58	70,37	23,56	24,21	67,27	25,11	25,31	69,35
01-10	23,85	23,94	24,39	69,24	24,10	24,62	67,71	23,56	24,18	66,54	25,15	25,38	67,33
01-11	23,75	23,81	24,25	64,44	24,17	24,73	61,54	23,40	23,99	63,82	25,19	25,48	61,27
01-12	23,49	23,52	23,92	59,50	24,06	24,60	56,24	23,14	23,65	59,60	24,71	25,08	54,39

b) Clima Aw – Honduras/ Tegucigalpa

Para o clima de savana tropical ou Aw, de acordo com o estudo paramétrico efetuado a melhor solução em termos de eficiência energética seria:

- Coeficiente de transferência de calor baixo;
- Percentagem de envidraçados baixa;
- Inercia térmica das paredes interiores alta;
- Refletividade da camada exterior da cobertura elevada.

No entanto, estes quatro parâmetros combinados resultaram num número de horas de desconforto muito elevado, cerca de 730,10 horas de desconforto anual.

Com estes parâmetros aplicados, os consumos dados foram quase nulos para a necessidade de aquecimento e cerca de 57,11 kWh/(m²ano) para a necessidade de arrefecimento, dando um consumo total de 93,63 kWh/(m²ano) e de energia primária cerca de 243,43 kWh/(m²ano).

Deste modo, optou-se pela aplicação das seguintes soluções:

- Coeficiente de transferência de calor alto;
- Percentagem de envidraçados baixa;
- Inercia térmica das paredes interiores baixa;
- Refletividade da camada exterior da cobertura elevada.

A casa modular vista na perspectiva do engenheiro mecânico

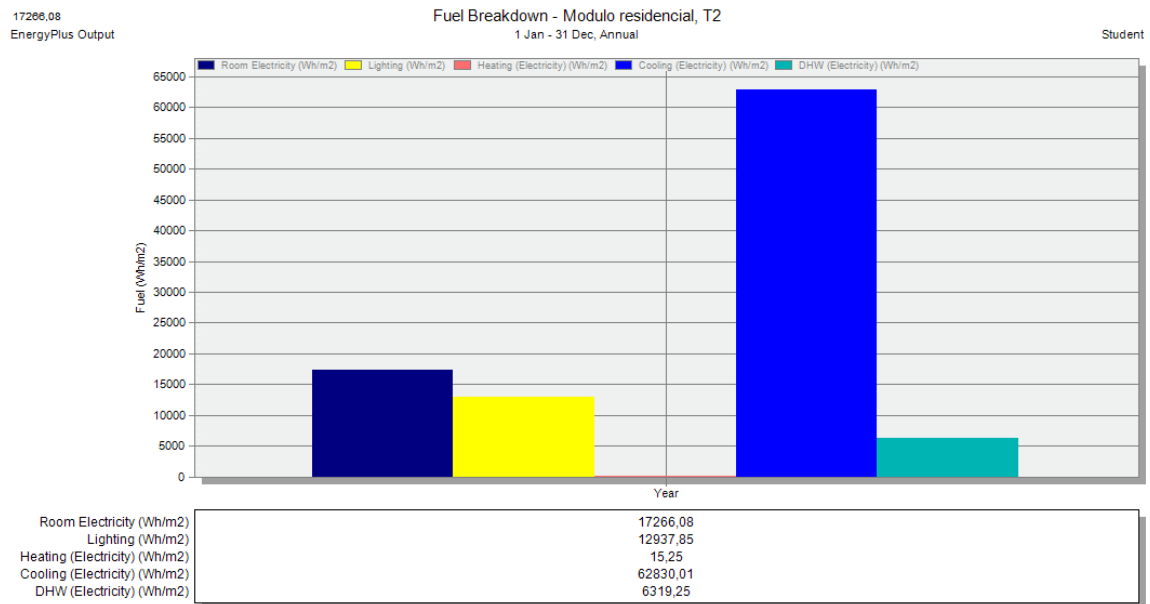


Figura 98 – Consumo energético total após aplicação das medidas resultantes da análise paramétrica para o clima Aw.

Obteve-se então, no consumo energético anual da proposta base para o clima BSh, que a energia total consumida é de 99,37 kWh/(m²ano), sendo a energia primária total consumida igual a 258,36 kWh/(m²ano), encontrando-se este valor muito acima dos requisitos para uma casa passiva ao nível do consumo energético.

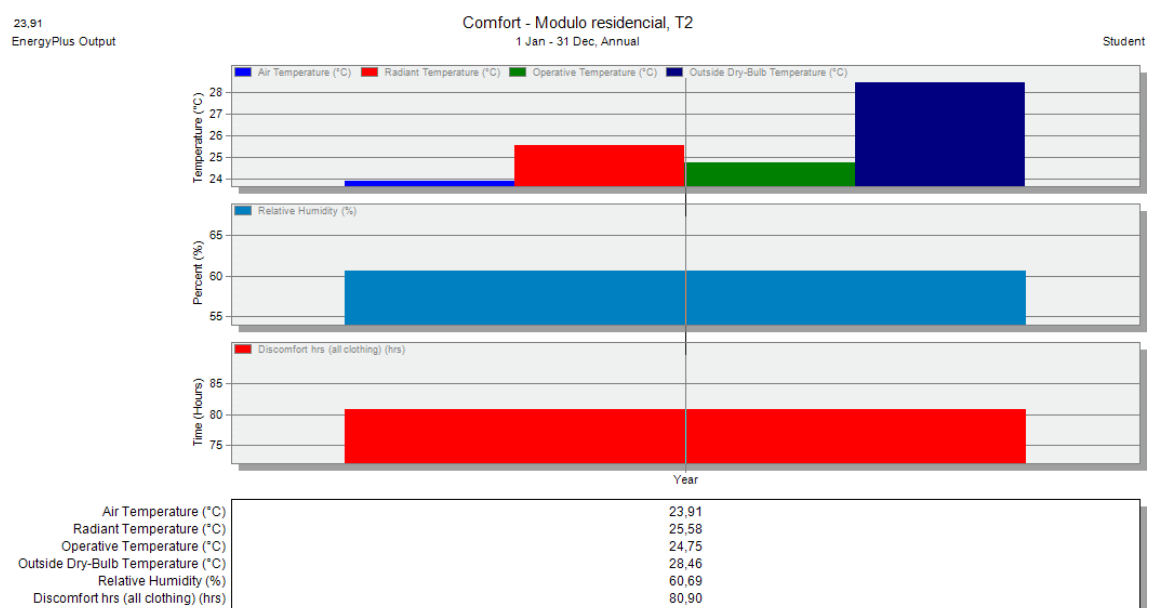


Figura 99 – Médias anuais de temperatura, humidade relativa e horas de conforto no interior da casa após aplicação das medidas resultantes da análise paramétrica para o clima Aw.

Relativamente ao conforto térmico, tem-se 80,90 horas de desconforto anuais na casa (inferior às 300 horas anuais de desconforto estipuladas). A média da temperatura operativa anual é de 24,75°C, sendo a média da temperatura do ar igual a 23,91°C, encontrando-se dentro do limite, ou seja, entre os 20°C e os 26°C, como também é possível observar de forma mais discriminada na Tabela 38. O WC é o compartimento mais crítico, onde nos meses de Janeiro, Fevereiro, Novembro e Dezembro não se atingem temperaturas de conforto.

Tabela 38 – Médias mensais da temperatura ambiente (T. A.), da temperatura operativa (T. Op.) e da humidade relativa (HR) no interior da casa após aplicação das medidas resultantes da análise paramétrica para o clima Aw.

	Geral		Quarto 1 – Norte/Este		Quarto 2 – Sul/ Este			Sala e Cozinha – Norte/Sul/Oeste			WC – Sul		
Data (2002)	T. A. (°C)	T. A. (°C)	T. Op. (°C)	HR	T. A. (°C)	T. Op. (°C)	HR	T. A. (°C)	T. Op. (°C)	HR	T. A. (°C)	T. Op. (°C)	HR
01-01	24,01	24,29	25,00	57,66	23,87	24,98	56,11	23,53	24,44	60,05	27,07	27,65	52,74
01-02	23,98	24,20	24,98	55,94	23,84	24,88	55,43	23,60	24,56	58,72	26,51	27,04	52,90
01-03	23,87	24,20	25,04	55,87	23,89	24,85	56,10	23,48	24,51	59,95	25,92	26,39	55,71
01-04	23,91	24,20	25,12	55,68	23,93	24,89	56,32	23,53	24,59	59,82	25,98	26,43	56,54
01-05	23,97	24,18	25,08	57,83	23,93	24,83	58,79	23,65	24,65	62,54	25,83	26,26	60,82
01-06	23,86	24,22	25,03	59,00	23,98	24,76	60,28	23,51	24,41	63,78	25,40	25,80	63,22
01-07	23,93	24,19	25,00	58,54	23,93	24,72	59,81	23,64	24,52	62,78	25,38	25,79	61,43
01-08	23,89	24,24	24,98	60,05	23,97	24,73	60,85	23,57	24,40	65,14	25,29	25,68	64,32
01-09	23,81	24,23	24,88	60,76	23,94	24,67	60,90	23,49	24,24	65,52	25,03	25,43	63,71
01-10	23,90	24,20	24,84	60,53	23,91	24,69	59,83	23,60	24,36	63,71	25,39	25,81	60,96
01-11	23,86	24,16	24,75	60,65	23,81	24,71	58,72	23,46	24,23	63,82	26,13	26,62	58,48
01-12	23,97	24,29	24,92	59,14	23,86	24,95	56,27	23,44	24,31	61,41	27,26	27,84	53,91

c) Clima BSk – Irão/ Teerão

Para o clima BSk chegou-se à conclusão que dentro das hipóteses estudadas a melhor solução a adotar seria:

- Coeficiente global de transferência de calor baixo;
- Percentagem de envidraçado baixa;
- Inercia térmica das paredes interiores alta;
- Refletividade da camada exterior da cobertura alta.

A casa modular vista na perspectiva do engenheiro mecânico

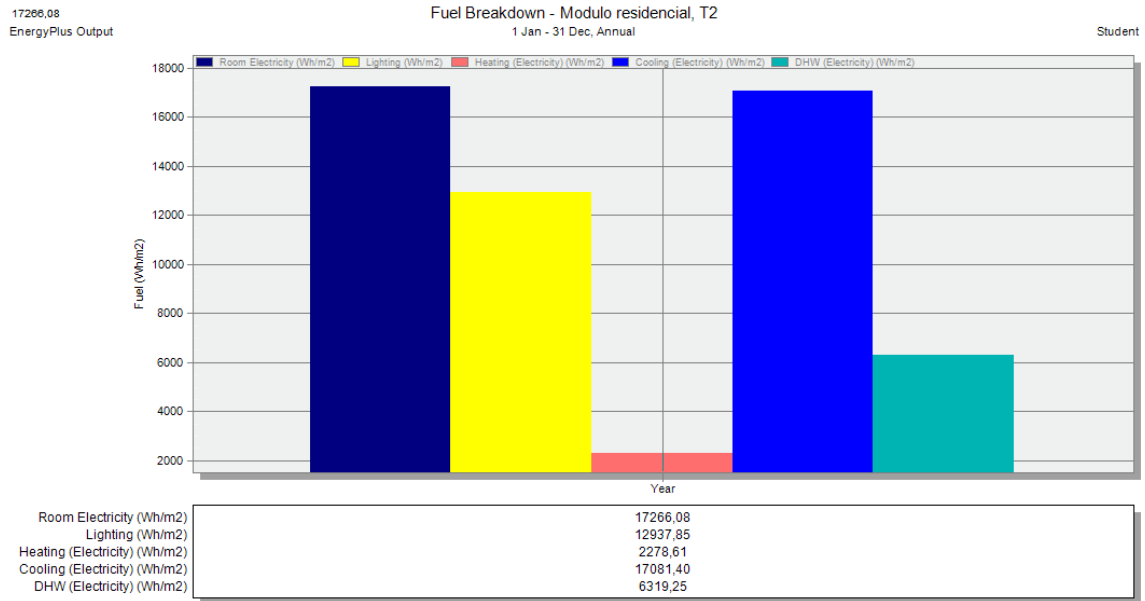


Figura 100 - Consumo energético total após aplicação das medidas resultantes da análise paramétrica para o clima BSk.

Ao nível do consumo energético anual, na proposta base do clima BSk, tem-se que a energia total consumida é de 55,88 kWh/(m²ano), sendo a energia primária total consumida igual a 145,30 kWh/(m²ano).

Para este clima, ao nível do conforto térmico, tem-se 4,40 horas de desconforto anuais na casa. A média da temperatura operativa anual é de 24,02°C, sendo a média da temperatura do ar igual a 23,51°C, encontrando-se dentro do limite.

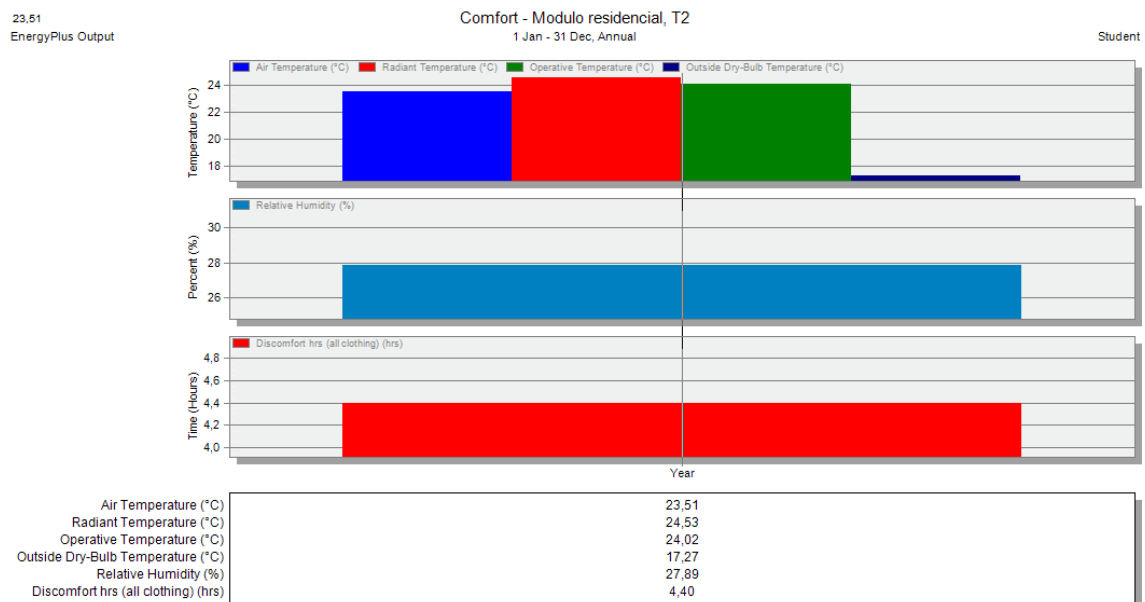


Figura 101 - Médias anuais de temperatura, humidade relativa e horas de conforto no interior da casa após aplicação das medidas resultantes da análise paramétrica para o clima BSk.

Como se pode observar na Tabela 39, os valores da temperatura ao longo do ano encontram-se dentro do limite mencionado em cima. Exceto mais uma vez no WC nos meses mais quentes onde excede o limite dos 26°C, não sendo, no entanto preocupante neste compartimento da casa, cuja ocupação é pouco relevante.

Tabela 39 - Médias mensais da temperatura ambiente (T. A.), da temperatura operativa (T. Op.) e da humidade relativa (HR) no interior da casa após aplicação das medidas resultantes da análise paramétrica para o clima BSk.

	Geral		Quarto 1 – Sul/Oeste		Quarto 2 – Norte/Oeste			Sala e Cozinha – Norte/Sul/Este			WC – Norte		
Data (2002)	T. A. (°C)	T. A. (°C)	T. Op. (°C)	HR	T. A. (°C)	T. Op. (°C)	HR	T. A. (°C)	T. Op. (°C)	HR	T. A. (°C)	T. Op. (°C)	HR
01-01	21,69	22,65	22,78	23,83	21,70	21,67	25,02	21,47	21,75	22,62	21,11	21,10	22,61
01-02	21,84	22,75	22,95	22,72	21,85	21,89	23,84	21,59	21,98	22,14	21,65	21,67	21,78
01-03	22,62	23,14	23,46	26,53	22,62	22,85	27,36	22,42	22,91	25,56	23,41	23,60	23,28
01-04	23,36	23,59	23,98	26,78	23,46	23,83	26,95	23,16	23,71	26,14	25,03	25,40	22,54
01-05	24,12	24,24	24,72	29,55	24,22	24,73	29,50	23,90	24,59	29,58	26,36	26,89	24,91
01-06	24,81	24,88	25,45	28,90	24,86	25,51	28,98	24,56	25,39	28,55	27,54	28,17	23,15
01-07	25,01	24,93	25,54	36,01	24,90	25,57	36,04	24,86	25,66	35,03	27,59	28,20	28,87
01-08	25,02	25,01	25,62	35,98	24,98	25,58	36,03	24,83	25,66	34,94	27,69	28,30	28,81
01-09	24,68	24,92	25,55	29,32	24,60	25,13	29,72	24,49	25,33	30,31	27,08	27,63	25,24
01-10	23,84	24,44	25,01	26,35	23,63	24,06	27,84	23,67	24,40	26,61	25,34	25,70	23,63
01-11	23,06	24,12	24,64	26,08	22,76	23,04	28,29	22,84	23,55	26,23	23,41	23,56	25,18
01-12	21,93	22,81	22,99	25,75	21,79	21,81	27,24	21,76	22,08	25,47	21,40	21,39	25,51

d) Clima Am – Suriname/ Zanderij

Para o clima de monção tropical ou Am chegou-se à conclusão que dentro das hipóteses estudadas a melhor solução a adotar seria ter:

- Coeficiente de transferência de calor baixo;
- Percentagem de envidraçado baixo;
- Inercia térmica das paredes interiores baixa;
- Refletividade da camada exterior da cobertura elevada.

A casa modular vista na perspectiva do engenheiro mecânico

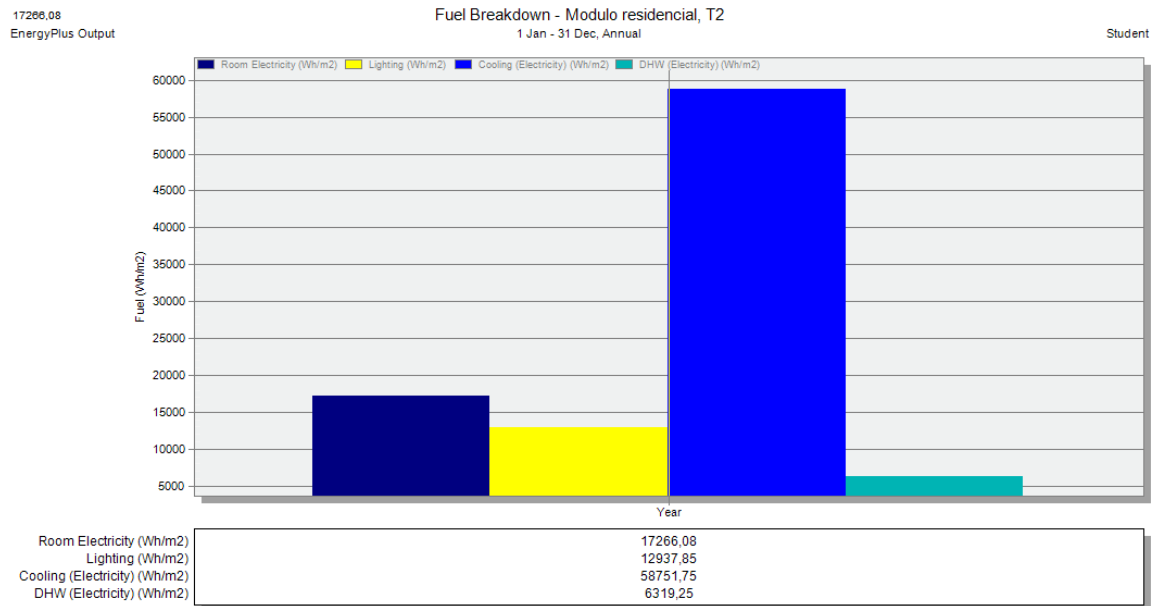


Figura 102 - Consumo energético total após aplicação das medidas resultantes da análise paramétrica para o clima Am.

No consumo energético anual, da proposta base do clima Am, tem-se que a energia total consumida é de 95,28 kWh/(m²ano), sendo a energia primária total consumida igual a 247,73 kWh/(m²ano), encontrando-se muito acima dos requisitos para uma casa passiva ao nível do consumo energético.

Relativamente ao conforto térmico, tem-se 82,40 horas de desconforto anuais na casa. A média da temperatura operativa anual é de 24,29°C, sendo a média da temperatura do ar igual a 23,55°C.

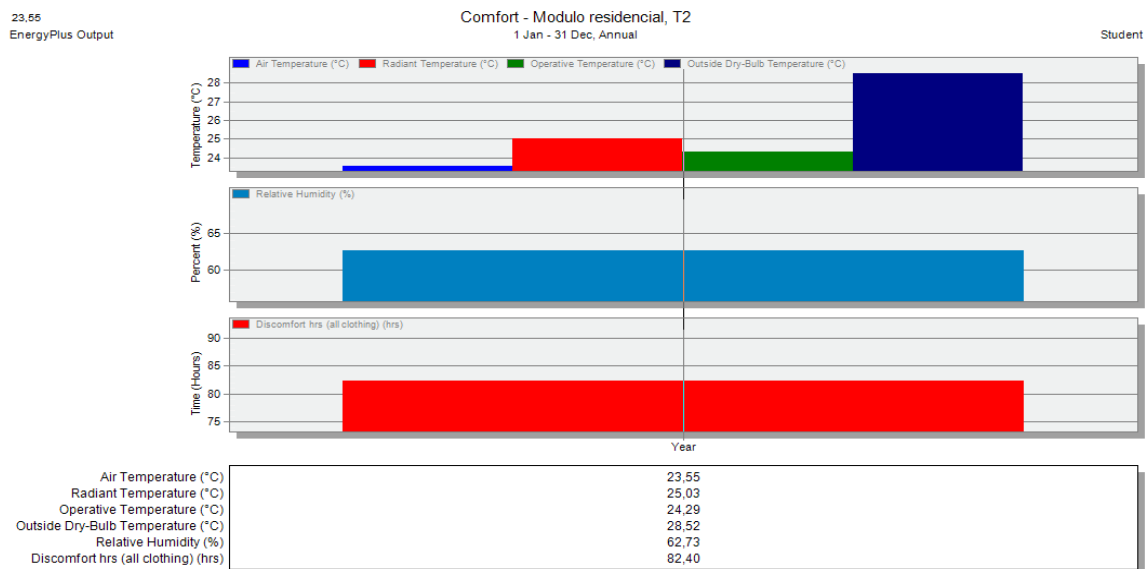


Figura 103 - Médias anuais de temperatura, humidade relativa e horas de conforto no interior da casa após aplicação das medidas resultantes da análise paramétrica para o clima Am.

Como também se pode observar na Tabela 40, onde encontram-se discriminadas as temperaturas ao longo do ano para cada compartimento da casa, mais uma vez observa-se que o WC é o compartimento mais crítico, excedendo a temperatura limite durante todo o ano.

Tabela 40 - Médias mensais da temperatura ambiente (T. A.), da temperatura operativa (T. Op.) e da humidade relativa (HR) no interior da casa após aplicação das medidas resultantes da análise paramétrica para o clima Am.

	Geral		Quarto 1 – Norte/Este		Quarto 2 – Sul/ Este			Sala e Cozinha – Norte/Sul/Oeste			WC - Sul		
Data (2002)	T. A. (°C)	T. A. (°C)	T. Op. (°C)	HR	T. A. (°C)	T. Op. (°C)	HR	T. A. (°C)	T. Op. (°C)	HR	T. A. (°C)	T. Op. (°C)	HR
01-01	23,56	24,40	24,96	60,27	24,36	25,09	58,18	22,66	23,48	63,19	26,58	26,95	57,58
01-02	23,56	24,33	24,95	58,05	24,31	25,03	27,20	22,69	23,57	62,83	26,53	26,87	57,67
01-03	23,52	24,35	24,96	57,96	24,35	25,01	57,62	22,65	23,53	62,81	26,32	26,62	57,65
01-04	23,52	24,34	24,95	59,91	24,36	24,98	60,06	22,66	23,51	64,08	26,23	26,51	60,19
01-05	23,56	24,35	24,98	60,87	24,39	24,99	61,97	22,74	23,58	65,67	26,08	26,36	62,99
01-06	23,47	24,33	24,94	61,90	24,38	24,94	63,51	22,62	23,45	66,83	26,90	26,17	64,42
01-07	23,51	24,31	24,94	61,57	24,36	24,94	63,03	22,69	23,52	66,26	26,93	26,21	64,03
01-08	23,53	24,34	24,99	60,52	24,38	25,01	61,25	22,67	23,55	65,71	26,17	26,47	62,86
01-09	23,57	24,35	25,01	59,09	24,36	25,06	59,05	22,71	23,61	64,56	26,48	26,79	60,87
01-10	23,59	24,37	25,00	59,85	24,35	25,06	59,14	22,73	23,61	64,97	26,58	26,90	61,64
01-11	23,60	24,39	25,00	60,12	24,34	25,09	58,53	22,70	23,59	64,78	26,85	27,20	61,01
01-12	23,56	24,39	24,97	59,63	24,32	25,11	57,31	22,62	23,49	63,80	26,97	27,35	58,46

e) Clima Dfb – Estónia/ Tallinn

Para o clima Dfb chegou-se à conclusão que dentro das hipóteses estudadas a melhor solução a adotar seria ter:

- Coeficiente global de transferência de calor baixo;
- Percentagem de envidraçado baixa;
- Inercia térmica das paredes interiores também alta;
- Refletividade da camada exterior da cobertura baixa.

A casa modular vista na perspectiva do engenheiro mecânico

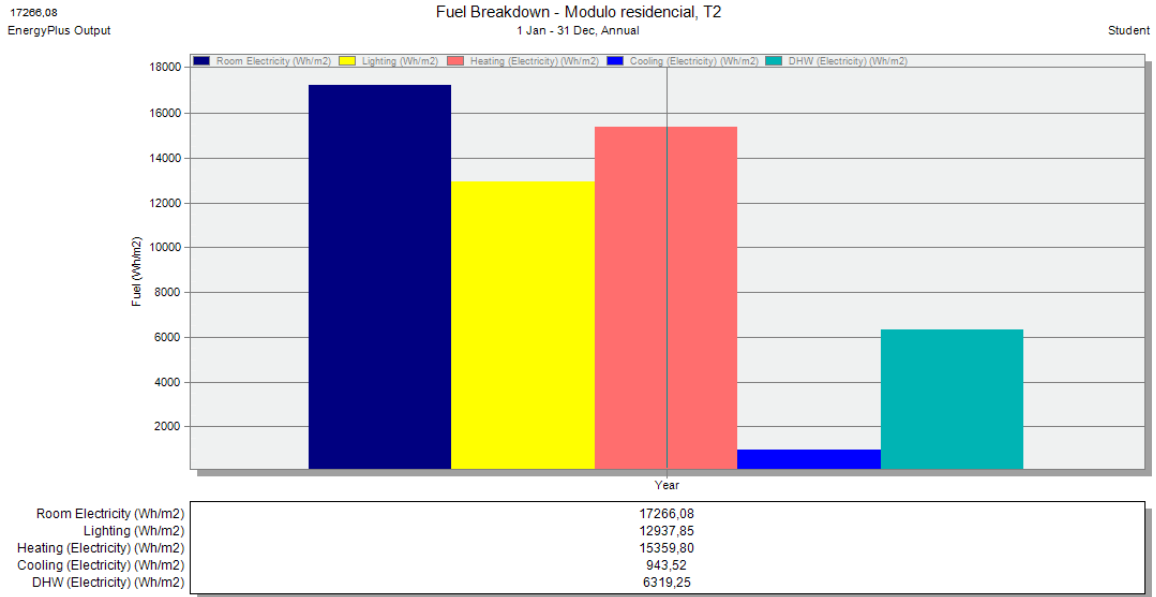


Figura 104 - Consumo energético total após aplicação das medidas resultantes da análise paramétrica para o clima Dfb.

No consumo energético anual, da proposta base do clima Dfb, tem-se que a energia total consumida é de 52,83 kWh/(m²ano), sendo a energia primária total consumida igual a 105,65 kWh/(m²ano).

Relativamente ao conforto térmico, tem-se 73,68 horas de desconforto anuais na casa. A média da temperatura operativa anual é de 21,52°C, sendo a média da temperatura do ar igual a 21,44°C, encontrando-se dentro do limite

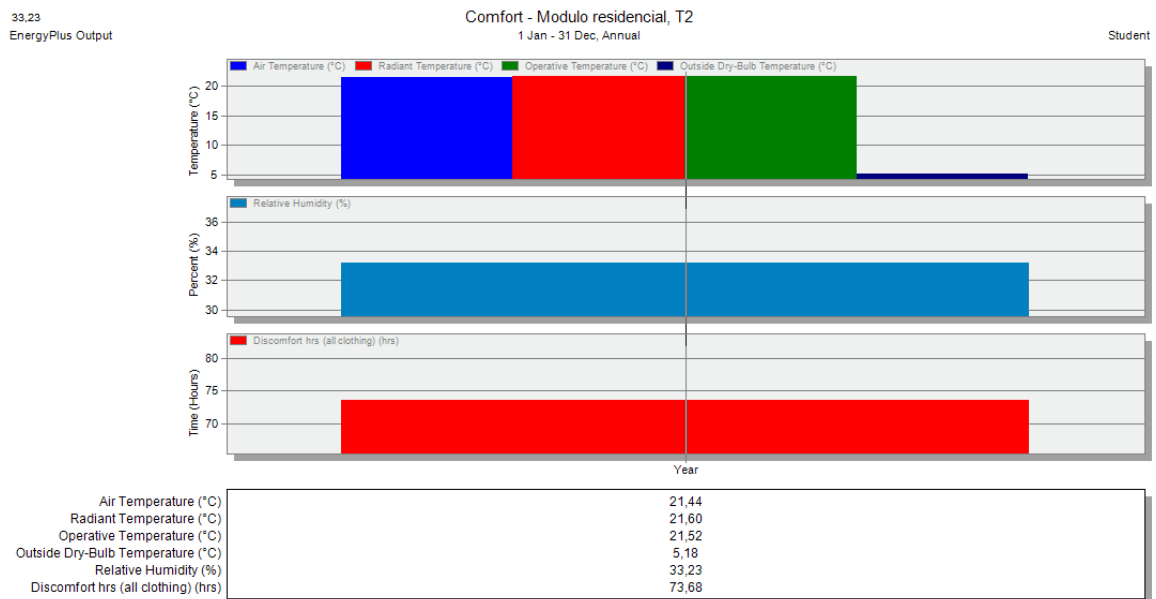


Figura 105 - Médias anuais de temperatura, humidade relativa e horas de conforto no interior da casa após aplicação das medidas resultantes da análise paramétrica para o clima Dfb.

Mais uma vez, como se pode observar na tabela das médias mensais das temperaturas e da humidade relativa (Tabela 41), existem temperaturas de conforto térmico todo o ano, exceto no WC nos meses mais frios como seria de esperar.

Tabela 41 - Médias mensais da temperatura ambiente (T. A.), da temperatura operativa (T. Op.) e da humidade relativa (HR) no interior da casa após aplicação das medidas resultantes da análise paramétrica para o clima Dfb.

Data (2002)	Geral		Quarto 1 – Sul/Oeste		Quarto 2 – Norte/Oeste			Sala e Cozinha – Norte/Sul/Este			WC – Norte		
	T. A. (°C)	T. A. (°C)	T. Op. (°C)	HR	T. A. (°C)	T. Op. (°C)	HR	T. A. (°C)	T. Op. (°C)	HR	T. A. (°C)	T. Op. (°C)	HR
01-01	20,29	20,49	20,07	24,66	20,50	19,99	24,68	20,39	19,81	22,19	18,81	18,69	23,30
01-02	20,24	20,66	20,40	20,86	20,38	19,94	21,18	20,28	19,89	19,14	18,81	18,73	20,09
01-03	20,37	20,97	25,37	25,37	20,49	20,27	26,02	20,28	20,18	24,36	19,55	19,55	24,78
01-04	20,71	21,57	28,66	28,66	21,10	21,14	29,42	20,35	20,71	28,59	20,74	20,74	27,46
01-05	22,04	22,77	32,05	32,05	22,31	22,69	32,73	21,68	22,35	31,72	22,54	22,54	29,10
01-06	23,34	23,96	42,16	42,16	23,66	24,18	42,81	23,01	23,77	42,12	23,84	23,84	38,67
01-07	23,96	24,67	45,73	45,73	24,38	24,88	46,44	23,59	24,37	45,90	24,33	24,33	42,62
01-08	23,41	23,97	51,46	51,46	23,54	23,96	52,64	23,18	23,81	51,66	23,67	23,67	48,56
01-09	21,49	22,16	44,15	44,15	21,71	21,83	45,20	21,21	21,57	44,43	21,63	21,63	42,94
01-10	20,64	21,21	37,26	37,26	20,90	20,75	37,88	20,46	20,41	36,73	20,25	20,25	36,79
01-11	20,31	20,50	27,06	27,06	20,48	20,05	27,14	20,39	19,88	25,33	19,09	19,09	26,37
01-12	20,37	20,46	24,20	24,20	20,48	19,96	24,20	20,53	19,88	22,28	18,86	18,86	23,42

5.8. Estudo de otimização

Como já mencionado, um dos objetivos deste trabalho consiste em projetar uma casa modular unifamiliar que seja eficiente em termos de conforto térmico mas também com níveis de consumo energético mínimos, ou seja, que seja considerada Passiva.

De modo a alcançar esse objetivo foi necessário recorrer a medidas que contribuam para a diminuição do consumo energético da casa, otimizando-a.

As medidas normalmente utilizadas vão desde o aumento ou diminuição da espessura do isolamento (diretamente relacionada com o coeficiente de transferência de calor - U), à alteração do tipo de vidro, ao tipo de lâmpadas, ao tipo de sombreamentos, etc.

No sistema AVAC também se optou em alguns casos por aumentar a eficiência do recuperador de calor. A Casa Passiva só pode funcionar com uma recuperação de calor altamente eficiente, como sistemas de ventilação, sem resíduos de recuperação de calor muito mais energia por ano do que uma Casa Passiva usa

para o calor. Os sistemas de ventilação utilizados nas Casas Passivas devem, assim, ter a eficiência de recuperação de calor de pelo menos 75%.

Nos pontos seguintes são apresentadas as medidas utilizadas consoante o tipo de clima e os resultados obtidos após as alterações efetuadas.

a) Clima BSh – Senegal/ Dakar

Na otimização da casa modular para o clima semiárido quente ou BSh, foi necessário alterar alguns aspetos da casa da proposta base, tais como:

- Aumento da espessura do isolamento dos painéis das paredes exteriores, cobertura e pavimento, alterando o coeficiente de transferência de calor (U) para 0,1 W/(m²K) nas paredes exteriores e pavimento e 0,075 W/(m²K) na cobertura;
- Alteração dos mecanismos de sombreamento tanto da janela como local, tendo-se optado por colocar estores venezianos exteriores e uma grelha de sombreamento de 1m com pala horizontal e vertical de 1m também;
- Alteração de vidro duplo com argon para vidro triplo com argon e U=0,780 W/(m²K);
- Substituição das lâmpadas fluorescentes T8 por lâmpadas do tipo LED suspensas.

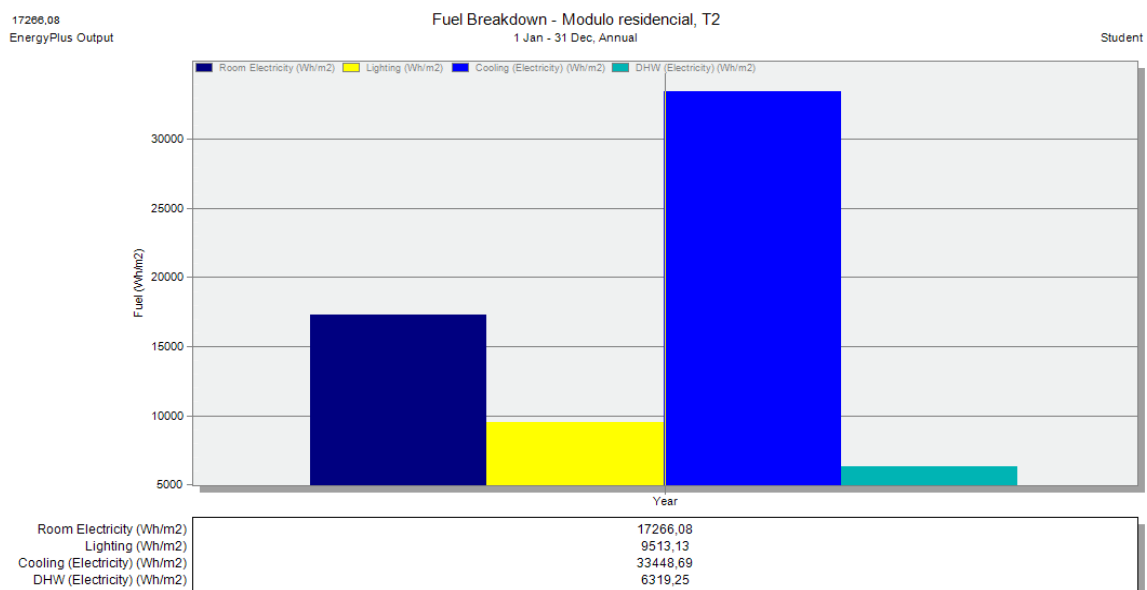


Figura 106 – Consumo energético anual desagregado após otimização, para o clima BSh.

No consumo energético anual, da proposta base do clima BSh, tem-se que a energia total consumida é de 66,54 kWh/(m²ano), sendo a energia primária total consumida igual a 173,01 kWh/(m²ano), não atingindo-se os requisitos para uma casa passiva ao nível do consumo energético, ou seja, necessidades de arrefecimento e aquecimento inferiores a 15 kWh/(m²ano), como se pode observar na Figura 106, e um total de energia primária consumida inferior a 120 kWh/(m²ano).

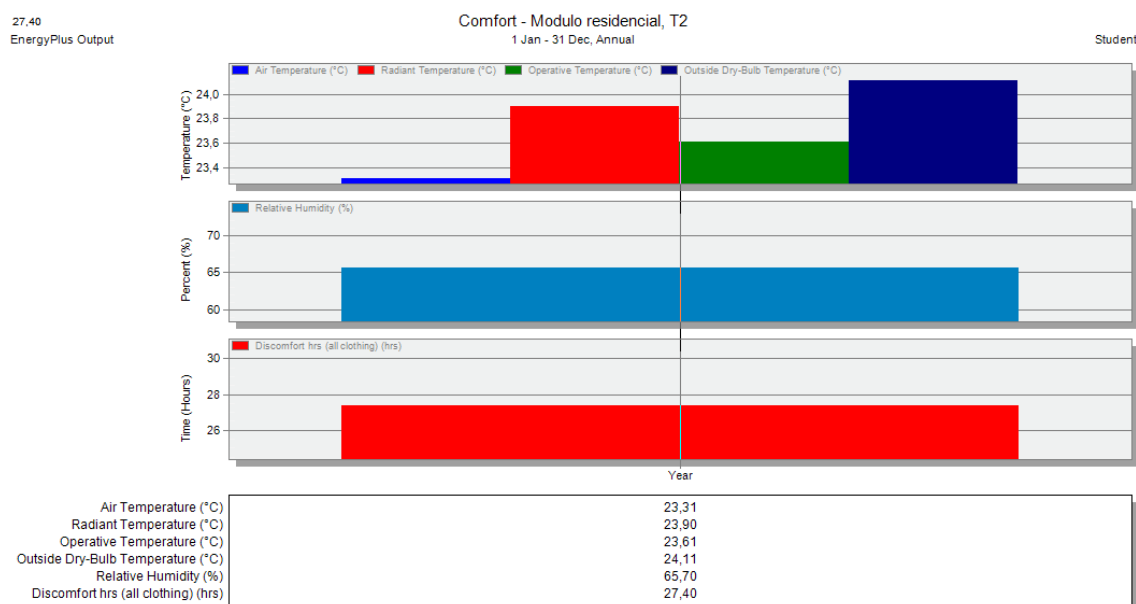


Figura 107 – Médias anuais da temperatura do ar, da humidade relativa e das horas de desconforto no interior da casa após otimização, para o clima BSh.

Relativamente ao conforto térmico anual, tem-se 27,40 horas de desconforto anuais na casa, valor muito inferior às 300 horas anuais de desconforto estipuladas. A média da temperatura operativa anual é de 23,61°C, sendo a média da temperatura do ar igual a 23,31°C, cumprindo com a temperatura requerida.

Na Tabela 42 constata-se também que com as medidas de otimização foi possível alcançar temperaturas de conforto para todo o ano e em todos os compartimentos da casa, incluindo o WC que até então era a divisória mais crítica.

Tabela 42 - Médias mensais da temperatura ambiente (T. A.), da temperatura operativa (T. Op.) e da humidade relativa (HR) no interior da casa após aplicação das medidas resultantes do estudo de otimização para o clima BSh.

	Geral				Quarto 1 – Norte/Este			Quarto 2 – Sul/ Este			Sala e Cozinha – Norte/Sul/Oeste			WC - Sul		
Data (2002)	T. A. (°C)	T. A. (°C)	T. Op. (°C)	HR	T. A. (°C)	T. Op. (°C)	HR	T. A. (°C)	T. Op. (°C)	HR	T. A. (°C)	T. Op. (°C)	HR	T. A. (°C)	T. Op. (°C)	HR
01-01	23,00	23,14	23,35	56,66	23,14	23,35	56,72	22,98	23,20	55,79	22,64	22,89	53,01			
01-02	22,98	23,05	23,28	59,51	23,05	23,28	59,58	22,98	23,21	59,19	22,67	22,92	57,22			
01-03	23,05	23,14	23,40	62,73	23,14	23,39	62,80	23,03	23,30	61,91	22,86	23,11	60,72			
01-04	23,07	23,18	23,43	65,43	23,18	23,42	65,54	23,03	23,32	64,06	22,93	23,17	63,53			
01-05	23,27	23,30	23,60	68,64	23,30	23,59	68,74	23,24	23,56	65,84	23,36	23,57	67,53			
01-06	23,40	23,42	23,72	70,86	23,41	23,72	70,90	23,34	23,70	66,96	23,74	23,91	70,72			
01-07	23,57	23,51	23,83	71,53	23,51	23,83	71,51	23,53	23,89	67,31	24,09	24,22	72,01			
01-08	23,59	23,52	23,84	75,96	23,52	23,85	75,90	23,55	23,92	70,22	24,21	24,31	76,74			
01-09	23,62	23,56	23,89	74,21	23,56	23,90	74,09	23,56	23,95	69,19	24,28	24,39	75,21			
01-10	23,61	23,54	23,86	72,42	23,55	23,88	72,27	23,56	23,93	68,28	24,20	24,32	73,48			
01-11	23,41	23,41	23,70	67,36	23,42	23,71	67,26	23,36	23,70	65,54	23,71	23,87	67,91			
01-12	23,15	23,19	23,44	61,86	23,19	23,44	61,86	23,15	23,43	61,20	23,03	23,25	60,70			

b) Clima Aw – Honduras/ Tegucigalpa

Para o clima de savana tropical ou Aw, as medidas de otimização efetuadas estiveram mais relacionadas com medidas de sombreamento. Optou-se então por:

- Substituir as cortinas escuras por estores venezianos exteriores e substituir a pala horizontal de 0,5m por uma pala horizontal de 1,0m;
- Substituir as lâmpadas fluorescentes T8 por lâmpadas do tipo LED suspensas.

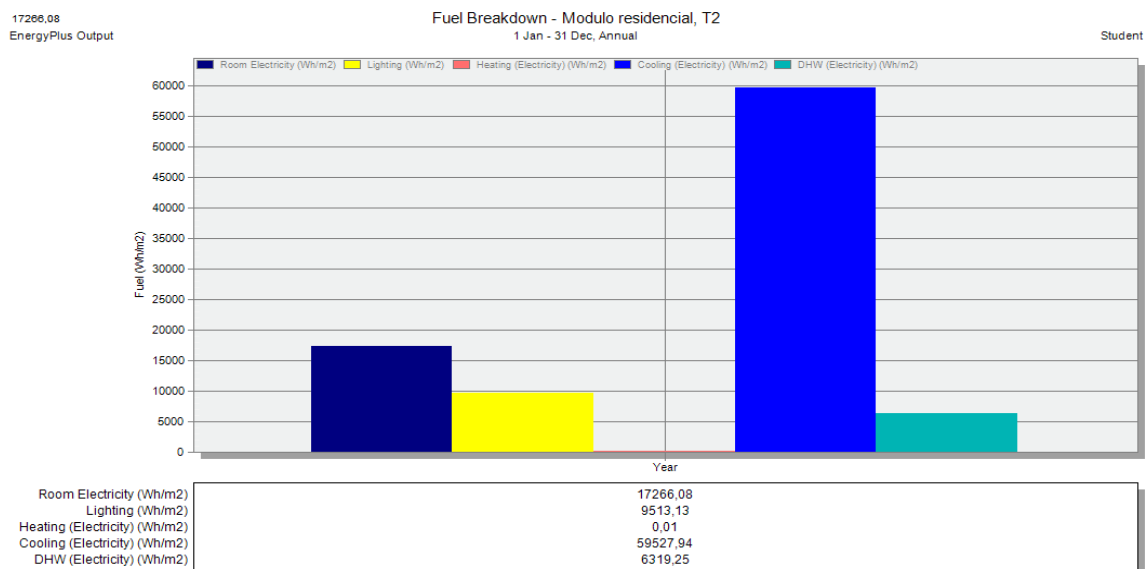


Figura 108 – Consumo energético anual desagregado após otimização, para o clima Aw.

No estudo de otimização para o clima Aw atingiu-se um mínimo de 92,63 kWh/(m²ano) no consumo energético anual, e uma energia primária total consumida igual a 240,83 kWh/(m²ano), não se tendo atingindo os requisitos para uma casa passiva ao nível do consumo energético.

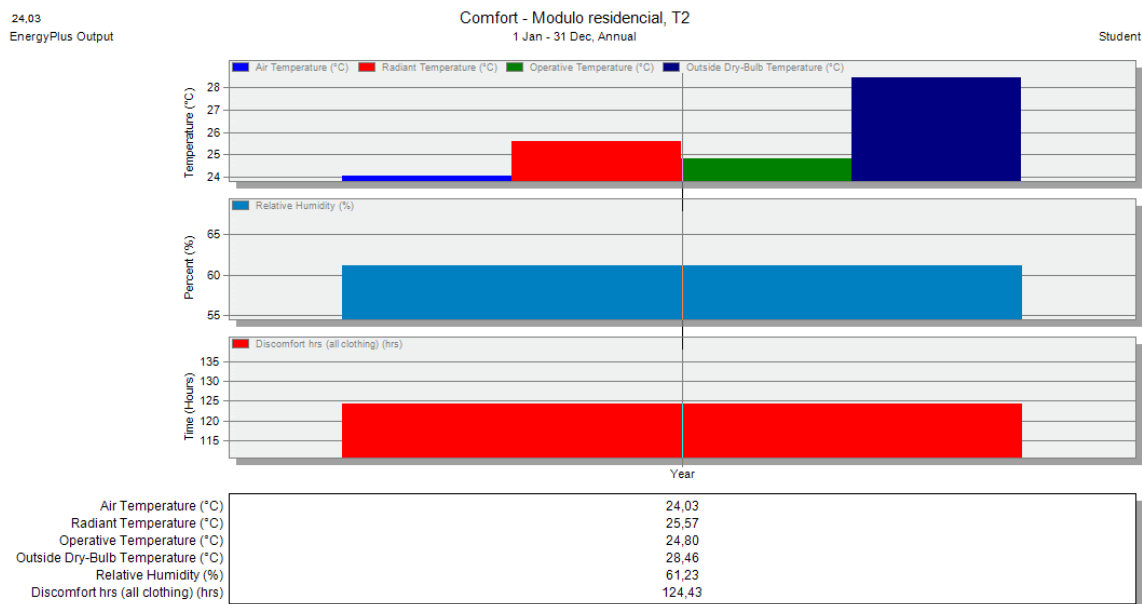


Figura 109 – Médias anuais da temperatura do ar, da humidade relativa e das horas de desconforto no interior da casa após otimização, para o clima Aw.

Relativamente ao conforto térmico anual, tem-se 124,43 horas de desconforto anuais na casa. A média da temperatura operativa anual é de 24,80°C, sendo a média da temperatura do ar igual a 24,03°C, o que é bastante aceitável para este tipo de clima e cumpre com os requisitos.

De acordo com a Tabela 43, observa-se que com as medidas de otimização conseguiu-se manter temperaturas de conforto durante todo o ano, para todos os compartimentos.

Tabela 43 - Médias mensais da temperatura ambiente (T. A.), da temperatura operativa (T. Op.) e da humidade relativa (HR) no interior da casa após aplicação das medidas resultantes do estudo de otimização para o clima Aw.

Data (2002)	Geral		Quarto 1 – Norte/Este		Quarto 2 – Sul/ Este			Sala e Cozinha – Norte/Sul/Oeste			WC - Sul		
	T. A. (°C)	T. A. (°C)	T. Op. (°C)	HR	T. A. (°C)	T. Op. (°C)	HR	T. A. (°C)	T. Op. (°C)	HR	T. A. (°C)	T. Op. (°C)	HR
01-01	24,08	24,30	24,99	57,92	24,26	25,16	56,32	23,70	24,52	60,68	25,95	26,45	55,35
01-02	24,09	24,21	24,97	56,08	24,19	25,11	55,22	23,76	24,65	59,12	26,00	26,49	54,15
01-03	24,02	24,20	25,03	55,97	24,20	25,10	55,71	23,65	24,60	60,19	25,87	26,33	55,91
01-04	24,07	24,20	25,11	55,79	24,23	25,15	55,98	23,71	24,70	60,00	25,95	26,39	56,59
01-05	24,13	24,19	25,08	57,98	24,24	25,08	58,60	23,85	24,76	63,09	25,80	26,22	61,03
01-06	24,00	24,23	25,02	59,23	24,28	25,00	60,10	23,67	24,49	64,62	25,34	25,73	63,53
01-07	24,08	24,19	24,99	58,73	24,24	24,97	59,52	23,82	24,61	63,75	25,33	25,74	61,71
01-08	24,04	24,25	24,97	60,26	24,27	24,98	60,63	23,74	24,50	66,28	25,24	25,63	64,57
01-09	23,94	24,23	24,87	60,99	24,24	24,91	60,68	23,63	24,32	66,64	24,97	25,35	64,03
01-10	24,02	24,19	24,82	60,77	24,21	24,92	59,77	23,74	24,44	64,59	25,21	25,61	61,64
01-11	23,93	24,16	24,74	60,93	24,14	24,88	59,18	23,61	24,30	64,89	25,32	25,75	60,72
01-12	24,01	24,29	24,91	59,51	24,25	25,12	56,73	23,58	24,37	62,20	25,96	26,44	57,15

c) Clima BSk – Irão/ Teerão

Na otimização da casa modular para o clima BSk, clima semiárido frio, onde os verões são quentes e secos e os invernos frios com alguma queda de neve, foi necessário alterar alguns aspetos da casa da proposta base, tais como:

- Aumento da espessura do isolamento dos painéis das paredes exteriores, cobertura e pavimento, alterando o coeficiente global de transferência de calor (U) para 0,1 W/(m²K) nas paredes exteriores e pavimento e 0,075 W/(m²K) na cobertura;
- Substituição das cortinas por estores venezianos exteriores, assim como a pala de 0,5m foi substituída por palas horizontais e palas verticais com 1 metro de projeção.
- Alteração de vidro duplo com argon para vidro triplo com cripton e U=0,705 W/(m²K);
- Substituição das lâmpadas fluorescentes T8 por lâmpadas do tipo LED suspensas;
- Alteração da eficácia do recuperador de calor de 0,80 para 0,85.

A casa modular vista na perspectiva do engenheiro mecânico

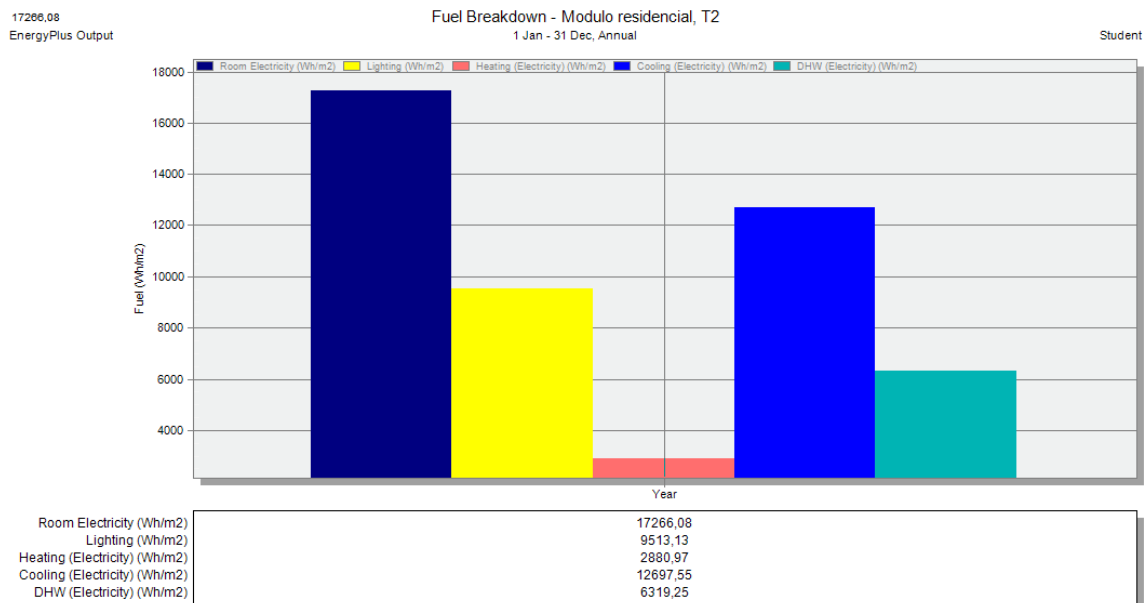


Figura 110 – Consumo energético anual desagregado após otimização, para o clima BSk.

No consumo energético anual, após a otimização para o clima BSk, tem-se que a energia total consumida é de 48,68 kWh/(m²ano), sendo a energia primária total consumida igual a 126,56 kWh/(m²ano), não se atingindo por pouco os requisitos para uma casa passiva ao nível do consumo energético.

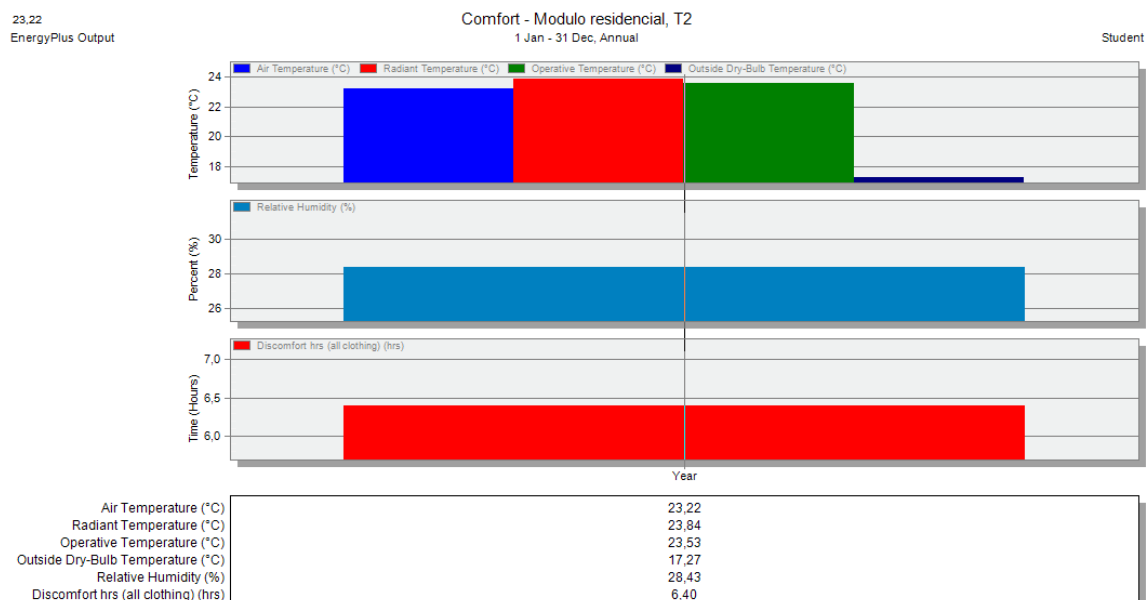


Figura 111 –Médias anuais da temperatura do ar, da humidade relativa e das horas de desconforto no interior da casa após otimização, para o clima BSk.

Relativamente ao conforto térmico anual, tem-se 6,40 horas de desconforto anuais na casa após a otimização. A média da temperatura operativa anual é de 23,53°C, sendo a média da temperatura do ar igual a 23,22°C, o que é bastante aceitável. Comparando a Tabela 39 com a Tabela 44, repara-se que as medidas implementadas no processo de otimização contribuíram também para que as médias das temperaturas ao longo do ano se mantivessem na região de conforto.

Tabela 44 - Médias mensais da temperatura ambiente (T. A.), da temperatura operativa (T. Op.) e da humidade relativa (HR) no interior da casa após aplicação das medidas resultantes do estudo de otimização para o clima BSk.

Data (2002)	Geral		Quarto 1 – Sul/Oeste		Quarto 2 – Norte/Oeste			Sala e Cozinha – Norte/Sul/Este			WC – Norte		
	T. A. (°C)	T. A. (°C)	T. Op. (°C)	HR	T. A. (°C)	T. Op. (°C)	HR	T. A. (°C)	T. Op. (°C)	HR	T. A. (°C)	T. Op. (°C)	HR
01-01	21,46	21,90	21,94	24,75	21,57	21,56	25,19	21,32	21,41	22,88	21,34	21,37	22,08
01-02	21,51	21,84	21,90	23,85	21,64	21,66	24,13	21,36	21,48	22,59	21,56	21,60	21,69
01-03	22,24	22,36	22,51	27,90	22,35	22,50	27,91	22,12	22,34	26,43	22,61	22,67	25,06
01-04	23,14	23,15	23,43	27,57	23,16	23,46	27,54	23,04	23,40	26,72	23,73	23,87	25,11
01-05	23,91	23,90	24,27	30,07	23,91	24,29	30,04	23,80	24,29	29,79	24,69	24,88	27,76
01-06	24,62	24,61	25,02	29,23	24,62	25,05	29,21	24,48	25,07	28,65	25,67	25,87	25,70
01-07	24,85	24,74	25,15	36,38	24,75	25,17	36,36	24,76	25,32	35,21	25,86	26,04	31,88
01-08	24,84	24,76	25,17	36,35	24,77	25,18	36,34	24,74	25,32	35,11	25,86	26,04	31,88
01-09	24,36	24,29	24,67	30,06	24,29	24,67	30,07	24,29	24,82	30,55	25,19	25,37	28,15
01-10	23,40	23,43	23,77	28,33	23,32	23,63	28,57	23,34	23,73	27,42	25,92	24,06	26,18
01-11	22,54	22,96	23,21	28,08	22,50	22,68	28,88	22,41	22,75	27,16	22,76	22,84	26,57
01-12	21,70	22,06	22,15	26,82	21,66	21,68	27,43	21,62	21,74	25,79	21,64	21,67	25,01

d) Clima Am – Suriname/ Zanderij

Na otimização da casa modular para o clima de monção tropical ou Am, foi necessário alterar alguns aspetos da casa da proposta base, tais como:

- Aumento da espessura do isolamento dos painéis das paredes exteriores, cobertura e pavimento, alterando o coeficiente global de transferência de calor (U) para 0,1 W/(m²K) nas paredes exteriores e pavimento e 0,075 W/(m²K) na cobertura;
- Substituição da cortina escura por estores venezianos exteriores e colocação de palas horizontais e verticais com 1m de projeção;
- Substituição das lâmpadas fluorescentes T8 por lâmpadas do tipo LED suspensas.

A casa modular vista na perspectiva do engenheiro mecânico

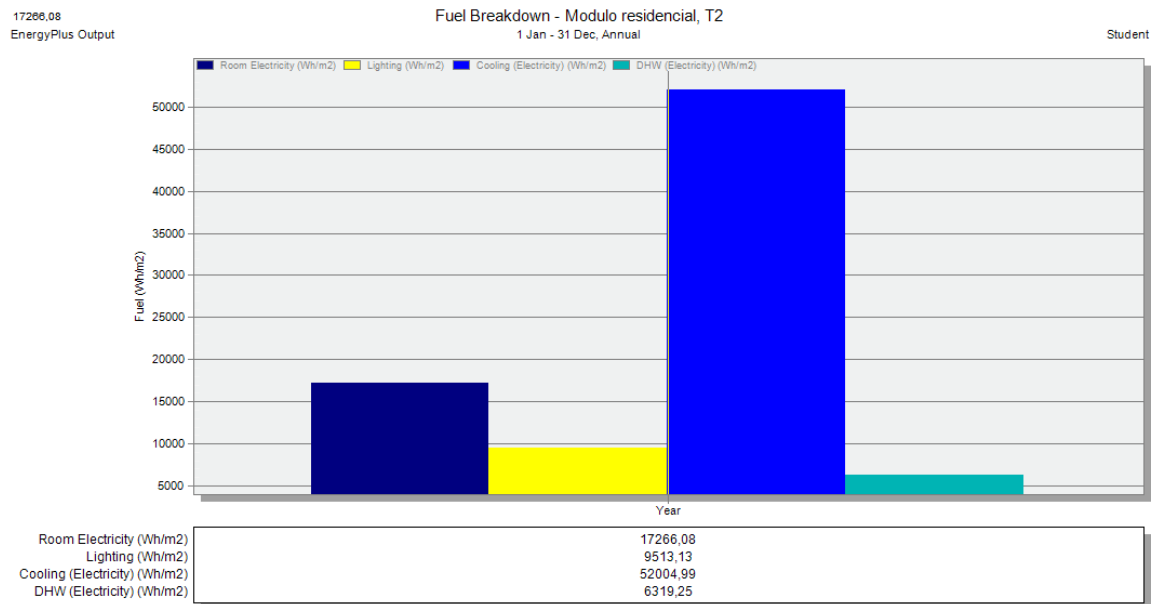


Figura 112 – Consumo energético anual desagregado após otimização, para o clima Am.

No estudo de otimização para o clima Aw atingiu-se um mínimo de 85,10 kWh/(m²ano) no consumo energético anual, e uma energia primária total consumida igual a 221,26 kWh/(m²ano), não tendo-se atingindo os requisitos para uma casa passiva ao nível do consumo energético.

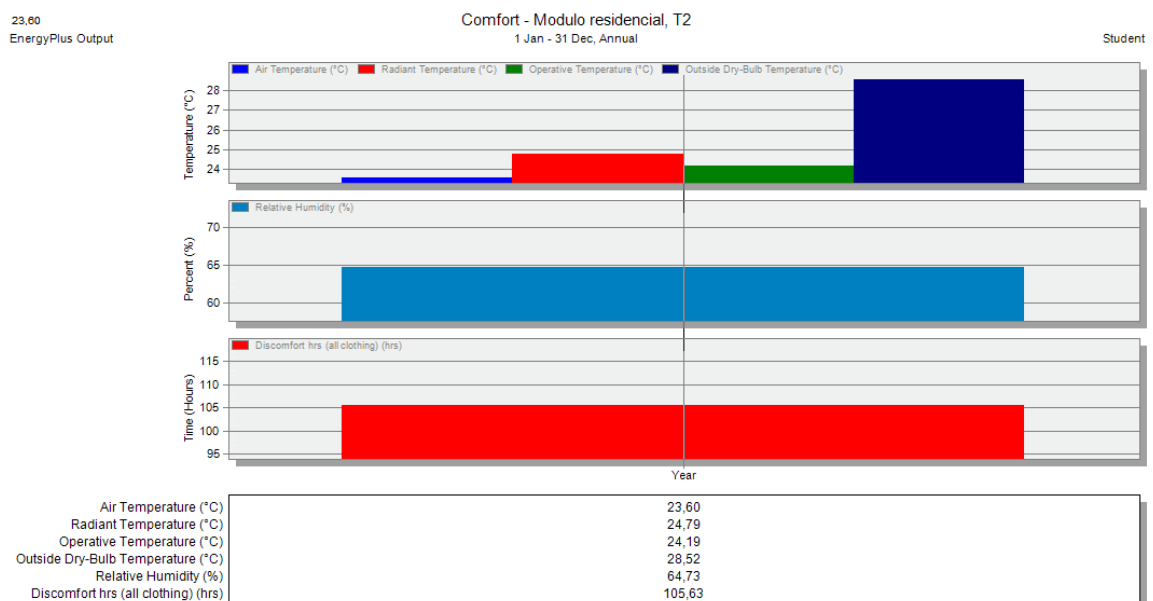


Figura 113 – Médias anuais da temperatura do ar, da humidade relativa e das horas de desconforto no interior da casa após otimização, para o clima Am.

Relativamente ao conforto térmico anual, tem-se 105,63 horas de desconforto anuais na casa. A média da temperatura operativa anual é de 24,19°C, sendo a média da temperatura do ar igual a 23,60°C, o que é bastante aceitável para o clima em questão. Observa-se também, que ao nível das temperaturas, não existiu grande alteração das mesmas, continuando o WC a não cumprir com o máximo de 26°C de temperatura durante alguns meses do ano.

Tabela 45 - Médias mensais da temperatura ambiente (T. A.), da temperatura operativa (T. Op.) e da humidade relativa (HR) no interior da casa após aplicação das medidas resultantes do estudo de otimização para o clima Am.

Data (2002)	Geral				Quarto 1 – Norte/Este			Quarto 2 – Sul/ Este			Sala e Cozinha – Norte/Sul/Oeste			WC - Sul		
	T. A. (°C)	T. A. (°C)	T. Op. (°C)	HR	T. A. (°C)	T. Op. (°C)	HR	T. A. (°C)	T. Op. (°C)	HR	T. A. (°C)	T. Op. (°C)	HR	T. A. (°C)	T. Op. (°C)	HR
01-01	23,57	24,39	24,85	62,87	24,39	24,89	62,04	22,78	23,46	64,40	25,80	26,03	60,48			
01-02	23,61	24,36	24,86	60,25	24,34	24,89	59,51	22,83	23,56	63,94	26,07	26,32	59,42			
01-03	23,58	24,38	24,88	60,08	24,36	24,90	59,31	22,77	23,52	63,77	26,08	26,33	59,19			
01-04	23,56	24,33	24,81	62,67	24,33	24,85	62,04	22,77	23,48	65,09	25,99	26,21	62,07			
01-05	23,62	24,36	24,81	65,66	24,37	24,85	65,03	22,87	23,54	67,47	25,82	26,04	65,30			
01-06	23,50	24,30	24,72	67,35	24,32	24,77	66,76	22,73	23,38	68,51	25,64	25,84	66,82			
01-07	23,56	24,30	24,75	66,97	24,32	24,79	66,41	22,84	23,49	68,24	25,67	25,89	66,48			
01-08	23,60	24,38	24,87	64,52	24,38	24,90	63,78	22,82	23,54	67,06	25,98	26,21	65,01			
01-09	23,66	24,41	24,94	61,52	24,38	24,97	60,72	22,86	23,62	65,58	26,32	26,56	62,72			
01-10	23,67	24,40	24,92	62,34	24,38	24,95	61,48	22,89	23,63	66,08	26,22	26,47	63,74			
01-11	23,65	24,40	24,89	63,13	24,39	24,93	62,18	22,87	23,59	66,26	26,16	26,38	63,83			
01-12	23,57	24,39	24,85	62,78	24,38	24,90	61,73	22,76	23,46	65,06	25,97	26,19	61,63			

e) Clima Dfb – Estónia/ Tallinn

Na otimização da casa modular para o clima Dfb, clima continental de verão quente, foi necessário alterar alguns aspetos da casa da proposta base, tais como:

- Aumento da espessura do isolamento dos painéis das paredes exteriores, cobertura e pavimento, alterando o coeficiente global de transferência de calor (U) para 0,1 W/(m²K) nas paredes exteriores e pavimento e 0,075 W/(m²K) na cobertura;
- Substituição das lâmpadas fluorescentes T8 por lâmpadas do tipo LED suspensas;
- Alteração da eficiência do recuperador de calor para 0,85.

A casa modular vista na perspectiva do engenheiro mecânico

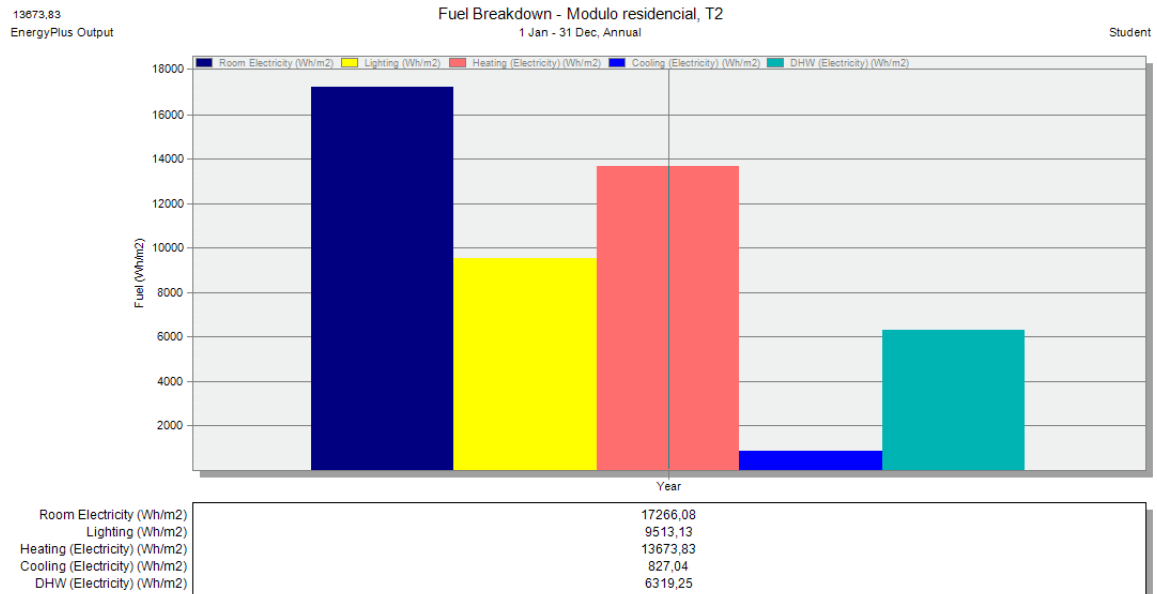


Figura 114 – Consumo energético anual desagregado após otimização, para o clima Dfb.

No consumo energético anual, da proposta base do clima Dfb, tem-se que a energia total consumida é de 47,60 kWh/(m²ano), sendo a energia primária total consumida igual a 95,20 kWh/(m²ano), atingindo-se os requisitos para uma casa passiva ao nível do consumo energético.

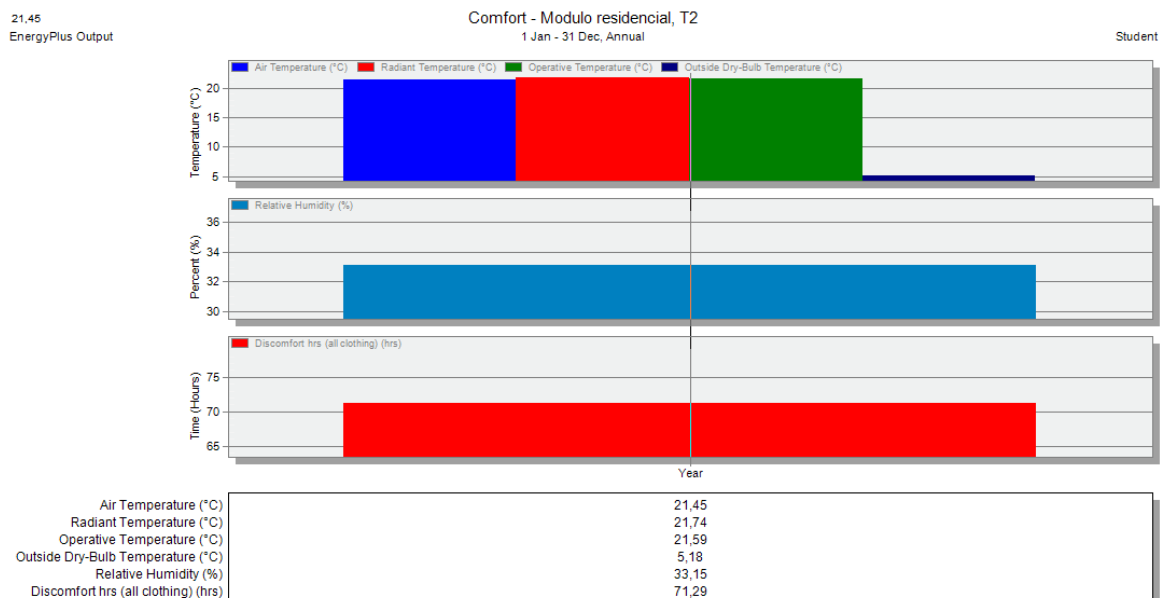


Figura 115 – Médias anuais da temperatura do ar, da humidade relativa e das horas de desconforto no interior da casa após otimização, para o clima Dfb.

Relativamente ao conforto térmico anual, tem-se 71,29 horas de desconforto anuais na casa, cumprindo com o limite de horas de desconforto estipuladas. A temperatura operativa anual é de 21,59°C, sendo a temperatura do ar igual a 21,45°C, o que é bastante aceitável. Constatou-se também para este clima que as medidas de otimização não contribuíram para que o WC atingisse temperaturas acima dos 20°C.

Tabela 46 - Médias mensais da temperatura ambiente (T. A.), da temperatura operativa (T. Op.) e da humidade relativa (HR) no interior da casa após aplicação das medidas resultantes do estudo de otimização para o clima Dfb.

Data (2002)	Geral		Quarto 1 – Sul/Oeste		Quarto 2 – Norte/Oeste			Sala e Cozinha – Norte/Sul/Este			WC – Norte		
	T. A. (°C)	T. A. (°C)	T. Op. (°C)	HR	T. A. (°C)	T. Op. (°C)	HR	T. A. (°C)	T. Op. (°C)	HR	T. A. (°C)	T. Op. (°C)	HR
01-01	20,21	20,43	20,14	24,69	20,41	20,04	24,71	20,27	19,84	22,32	18,94	18,87	23,09
01-02	20,17	20,64	20,50	20,84	20,30	20,00	21,20	20,18	19,94	19,22	18,96	18,93	19,87
01-03	20,36	20,98	20,95	25,30	20,50	20,38	25,94	20,24	20,24	24,39	19,70	19,73	24,47
01-04	20,77	21,60	21,79	28,57	21,14	21,24	29,30	20,41	20,79	28,49	20,87	20,99	27,27
01-05	22,05	22,77	23,23	31,98	22,34	22,75	32,64	21,68	22,35	31,69	22,61	22,90	29,04
01-06	23,40	24,00	24,55	41,97	23,71	24,23	42,63	23,07	23,83	41,99	23,90	24,33	38,61
01-07	24,06	24,73	25,29	45,40	24,43	24,94	46,17	23,72	24,48	45,63	24,39	24,84	42,53
01-08	23,50	24,08	24,57	51,06	23,64	24,08	52,26	23,26	23,90	51,45	23,75	24,10	48,36
01-09	21,56	22,21	22,46	43,96	21,78	21,95	44,97	21,27	21,66	44,26	21,75	21,86	42,72
01-10	20,69	21,26	21,24	37,07	20,95	20,88	37,67	20,49	20,52	36,61	20,40	20,39	36,42
01-11	20,25	20,46	20,20	27,09	20,42	20,12	27,18	20,29	19,92	25,43	19,22	19,15	26,08
01-12	20,28	20,38	20,04	24,26	20,39	20,01	24,27	20,40	19,91	22,40	18,99	18,91	23,22

5.9. Análise de resultados

Analisando os resultados globais obtidos, observa-se que ao nível do conforto térmico, foi possível atingir um número de horas de desconforto, para todos os climas, abaixo das 300 horas anuais estipuladas.

Para todos os climas não houve alteração relativamente ao consumo energético da eletricidade doméstica e nas necessidades de água quente sanitária. Existiu no entanto, com a substituição das lâmpadas fluorescentes T8 para LED, uma diminuição de cerca de 26% no consumo para a iluminação da casa.

Nos pontos seguintes é feita uma análise para cada clima em específico relativamente às necessidades de aquecimento e de arrefecimento.

a) Clima BSh – Senegal/ Dakar

Os resultados do estudo paramétrico auxiliaram na tomada de decisão para encontrar uma solução inicial para uma casa modular para o clima semiárido quente, onde a temperatura durante o dia é quente, muitas vezes extremamente quente, e durante a noite é frio, ou seja, é um clima com grandes amplitudes térmicas. Os resultados obtidos foram coerentes para o tipo de clima em questão. No estudo efetuado para a proposta base ou inicial, tendo em conta as soluções obtidas no estudo paramétrico efetuado anteriormente, comparando-se com a casa de referência, conseguiu-se diminuir as necessidades de arrefecimento em cerca de 12% e reduzido drasticamente as horas de desconforto anuais, que inicialmente eram de 248,64 horas para 34,15 horas.

Quanto aos resultados obtidos na otimização da casa, observa-se que com as medidas utilizadas foi possível baixar o consumo energético relativo às necessidades de arrefecimento em cerca de 21,6%, comparando-se com a solução da proposta base. Obteve-se também uma pequena diminuição no número de horas anuais de desconforto passando-se para 27,40 horas.

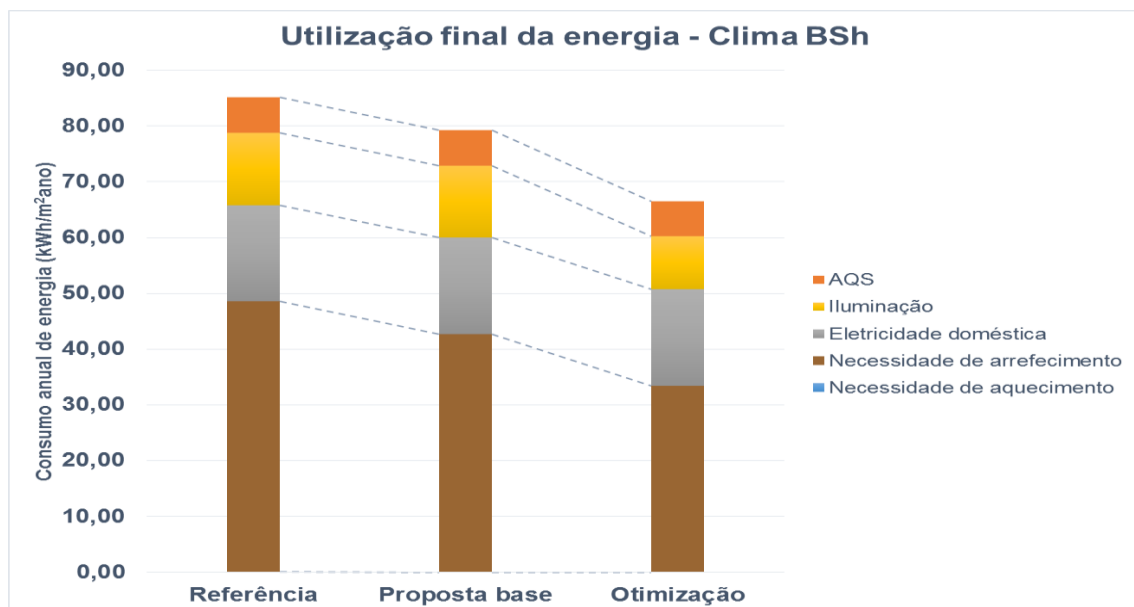


Figura 116 – Evolução do consumo anual de energia nas três fases do estudo para o clima BSh.

b) Clima Aw – Honduras/ Tegucigalpa

Os resultados do estudo paramétrico para o clima de savana tropical onde a temperatura ao longo do dia e ao longo de todo o ano varia muito pouco, acabaram por não ser coerentes, acabando-se por optar por uma solução mista. Ou seja, adotou-se os parâmetros do estudo paramétrico que de facto contribuíam para uma diminuição do consumo energético, como foi o caso da percentagem de envidraçado e da refletividade da camada exterior da cobertura. Procedeu-se à solução inversa relativamente ao coeficiente de transferência de calor e à inércia térmica das paredes interiores, o que contribuiu para uma solução, para a proposta base, com um consumo um pouco mais elevado, cerca de 5,74 kWh/(m²ano), mas conseguindo-se manter o conforto térmico no interior da casa.

Na proposta base, após adotada a solução mista, foi possível diminuir o consumo nas necessidades de arrefecimento em cerca de 13% em relação ao caso de referência, sendo as necessidades de aquecimento praticamente nulas ao longo do ano.

Após a otimização, com a alteração dos mecanismos de sombreamento, o consumo para as necessidades de arrefecimento diminuiu apenas 5%.

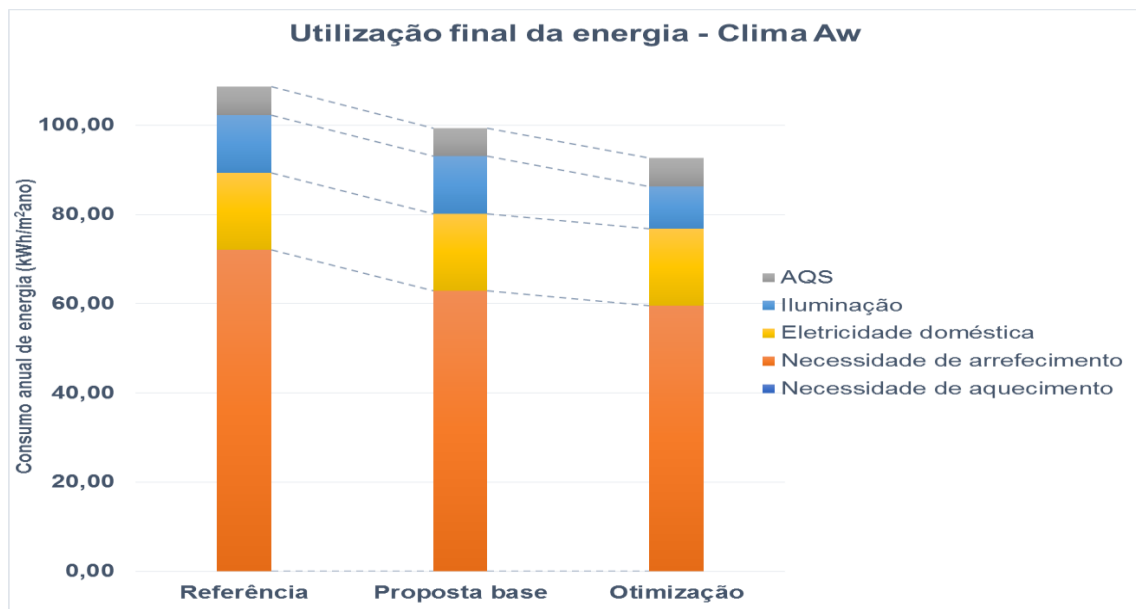


Figura 117 - Evolução do consumo anual de energia nas três fases do estudo para o clima Aw.

c) Clima BSk – Irã/ Teerão

Os resultados do estudo paramétrico para o clima semiárido frio, onde os verões são quentes e secos (muitas vezes excepcionalmente quentes) e os invernos são frios com alguma queda de neve, foram coerentes para o clima em questão.

Com a adoção das soluções construtivas obtidas no estudo paramétrico foi possível obter uma diminuição nas necessidades de aquecimento em cerca de 59,3%, relativamente à casa de referência. Quanto às necessidades de arrefecimento, que ainda assim são mais altas no clima BSk, obteve-se uma diminuição de 28,6% no consumo. Foi possível também diminuir o número de horas de desconforto anual, que já era baixo, passando de 10,81 horas para 4,40 horas.

Adotadas as medidas de otimização, a necessidade de aquecimento aumentou 26,3%, passando-se de 2,28 para 2,88 kWh/(m²ano). O valor do consumo para as necessidades de arrefecimento desceu 25,6%, obtendo-se 12,70 kWh/(m²ano), conseguindo-se cumprir com o requisitos ao nível das necessidades de aquecimento e arrefecimento para uma Casa Passiva, uma vez que ambos valores são inferiores a 15 kWh/(m²ano). No entanto, não cumpre com os 120 kWh/(m²ano) de energia primária por uma diferença de cerca de 6 kWh/(m²ano), devido ao fator de energia primária aplicado que é dos mais altos. As horas de desconforto aumentaram para mais duas horas de desconforto ao longo do ano, dando um total de 6,40 horas para a solução final.

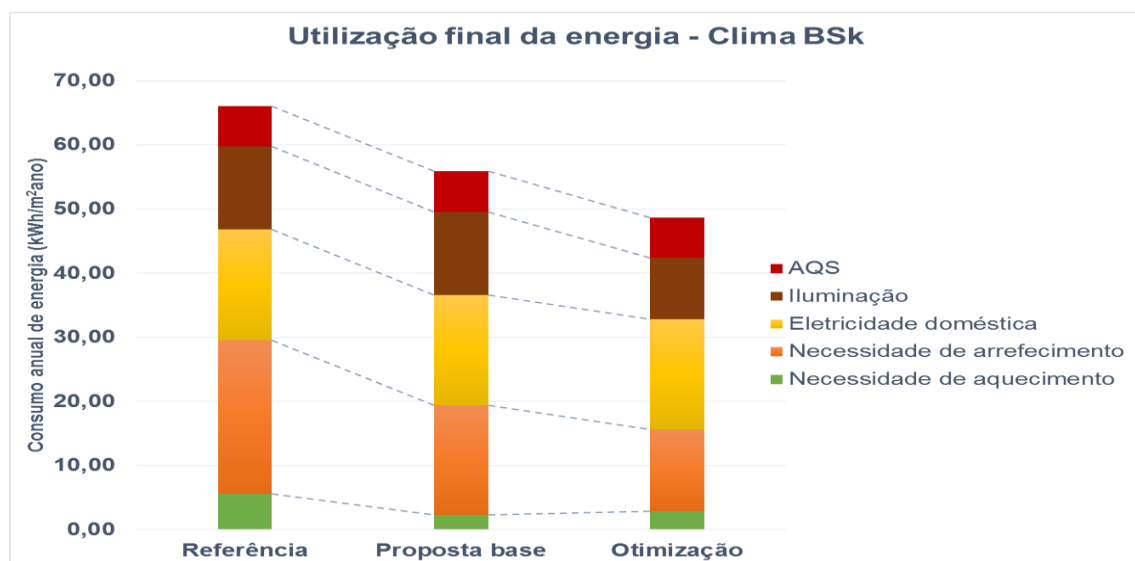


Figura 118 - Evolução do consumo anual de energia nas três fases do estudo para o clima BSk.

d) Clima Am – Suriname/ Zanderij

Os resultados obtidos para o clima de monção tropical (Am) que é constante ao longo do dia e do ano mas com mais precipitação do que o clima de savana tropical (Aw), foram coerentes.

Com a implementação das soluções obtidas no estudo paramétrico chegou-se a uma redução no consumo para as necessidades de arrefecimento de 19,7%. Relativamente ao número de horas de desconforto, estas soluções em conjunto contribuíram para o aumento do número de horas de desconforto anual, inerente à solução da proposta base, passando de 25,81 horas na casa de referencia para 82,4 horas.

Após a otimização onde nomeadamente, se baixou o coeficiente de transferência de calor de 0,15 W/(m²K) para 0,10 W/(m²K) e alterou-se os mecanismos de sombreamento, obtendo-se uma descida nas necessidades de arrefecimento em cerca de 11,5%. O número de horas de desconforto anual aumentou, passando para um total de 105,63 horas.

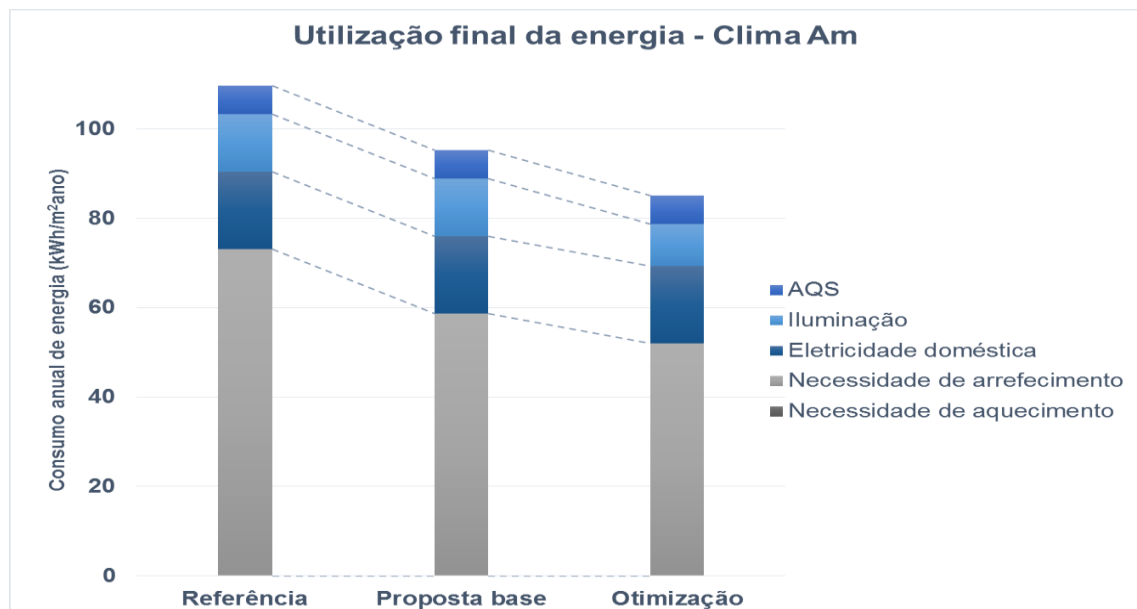


Figura 119 - Evolução do consumo anual de energia nas três fases do estudo para o clima Am.

e) Clima Dfb – Estónia/ Tallinn

Para o clima continental de verão quente ou Dfb, os resultados obtidos no estudo paramétrico foram coerentes de acordo com o clima em estudo.

Aplicando as soluções obtidas no estudo paramétrico à casa de referência, foi possível obter uma diminuição de cerca de 42,6% nas necessidades de aquecimento, que neste caso são as mais elevadas, descendo de 26,75 kWh/(m²ano) para 15,36 kWh/(m²ano), muito perto dos 15 kWh/(m²ano) que são requisito mínimo. Obteve-se também uma diminuição de cerca de 37,7% nas necessidades de arrefecimento, que neste clima são muito baixas, tendo-se passado de 1,51 kWh/(m²ano) para 0,94 kWh/(m²ano). Tal como as necessidades mencionadas, também as horas de desconforto baixaram de 90,39 horas para 73,68 horas.

Realizada a otimização, as necessidades de aquecimento desceram para 13,67 kWh/m²ano e as necessidades de arrefecimento também desceram, neste caso para 0,83 kWh/m²ano. Como se pode observar, ambos valores encontram-se abaixo dos 15 kWh/(m²ano), assim como o consumo total de energia primária que é de 95,20 kWh/(m²ano), sendo inferior aos 120 kWh/(m²ano) estipulados, cumprindo com todos os requisitos para uma Casa Passiva. No final obteve-se um total de horas de desconforto ao longo do ano de cerca de 71,29 horas.

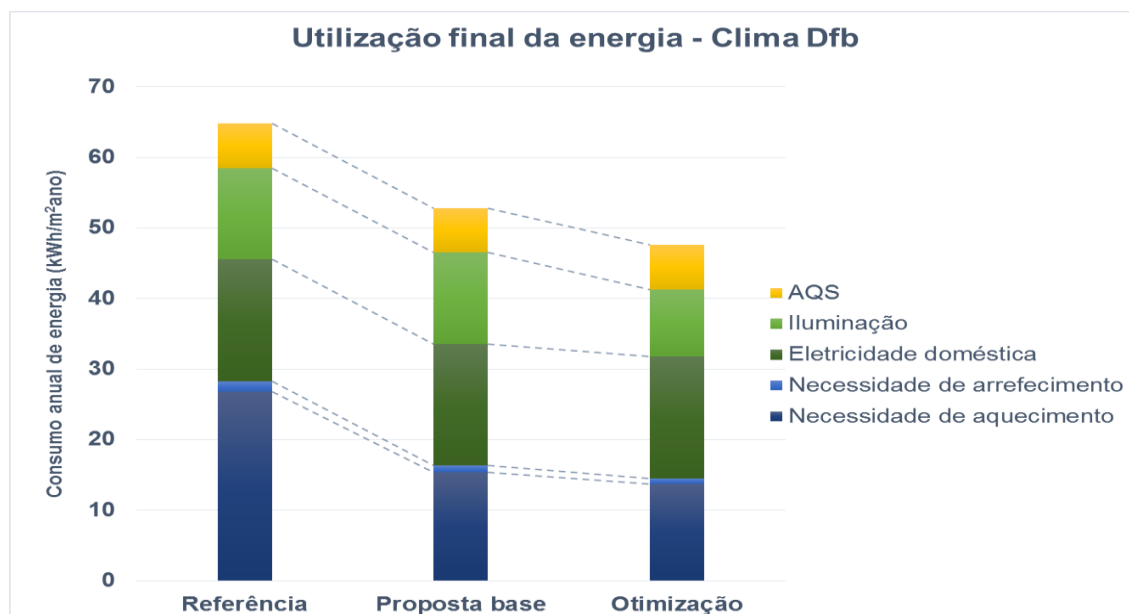


Figura 120 - Evolução do consumo anual de energia nas três fases do estudo para o clima Dfb.

5.10. Discussão da solução proposta

A discussão da solução proposta passa por mencionar as opções finais de projeto, após finalizado o processo de otimização, para as casas modulares para os diferentes climas.

Tabela 47 – Constituição e espessura dos componentes do painel da parede exterior para cada clima.

Painel Parede Exterior							
		δ (m)	BSh (Senegal/ Dakar)	Aw (Honduras/ Tegucigalpa)	BSk (Irão/ Teerão)	Am (Suriname/ Zanderij)	Dfb (Estónia/ Tallinn)
U = 0,10 W/(m²K)	(Camada exterior)						
	Pinho	0,0150					
	Superfície de metal	0,0020					
	Placa de poliuretano	0,2510	X		X	X	X
	Superfície de metal	0,0020					
	Pladur	0,0100					
	(Camada interior)						
	Espessura total:	0,2802					
U = 0,45 W/(m²K)	(Camada exterior)						
	Pinho	0,0150					
	Superfície de metal	0,0020					
	Placa de poliuretano	0,0489		X			
	Superfície de metal	0,0020					
	Pladur	0,0100					
	(Camada interior)						
	Espessura total:	0,0779					

Na Tabela 47 é possível observar que prevalece para a maior parte dos climas estudados painéis das paredes exteriores com um coeficiente de transferência de calor (U) de 0,10 W/(m²K), o que significa uma espessura do isolamento de 251 mm e uma espessura total do painel de cerca de 280 mm.

Para o clima de savana tropical (Aw), o procedimento acabou por ser diferente do efetuado para os restantes climas uma vez que os parâmetros estudados e utilizados na proposta base, quando combinados acabaram por contribuir para que as horas de desconforto aumentassem bastante, muito acima das 300 horas estipuladas. Por isso, optou-se por aplicar um coeficiente de transferência de calor de 0,45 W/(m²K) para as paredes exteriores, de modo a manter o conforto no interior da casa, implicando uma espessura do isolamento térmico de 48,9 mm e uma espessura total do painel de 77,9 mm.

Tabela 48 – Constituição e espessura dos componentes do painel da parede interior para cada clima.

Painel Parede Interior							
		δ (m)	BSh (Senegal/ Dakar)	Aw (Honduras/ Tegucigalpa)	BSk (Irão/ Teerão)	Am (Suriname/ Zanderij)	Dfb (Estónia/ Tallinn)
$I_{baixa} = 7,10$ $\text{kJm}^{-2}\text{K}^{-1}\text{s}^{-1/2}$	(Camada exterior)						
	Pladur	0,0100					
	Fibra mineral/ lã	0,0500		X		X	
	Pladur	0,0100					
	(Camada interior)						
$I_{alta} = 4190$ $\text{kJm}^{-2}\text{K}^{-1}\text{s}^{-1/2}$	Espessura total:	0,0700					
	(Camada exterior)		X				
	Pladur	0,0100					
	Água a 10°C	0,0500			X		X
	Pladur	0,0100					
	(Camada interior)						
	Espessura total:	0,0700					

Para os painéis das paredes internas teve-se como critério a consideração da inércia térmica como justificado anteriormente.

Para a maior parte dos climas estudados é mais eficiente ao nível do conforto e de consumo energético a aplicação de paredes internas com inércia térmica alta, cerca de $4190 \text{ kJm}^{-2}\text{K}^{-1}\text{s}^{-1/2}$, especialmente para climas que sofrem grandes amplitudes térmicas em pequenos espaços de tempo, como é o caso em especial dos climas semiárido quente (BSh) e semiárido frio (BSk) que são climas mais secos e que experimentam grandes variações de temperatura entre o dia e a noite.

Para os climas de savana tropical (Aw) e de monção tropical (Am) é mais eficiente que a inércia térmica seja mais baixa, cerca de $7,10 \text{ kJm}^{-2}\text{K}^{-1}\text{s}^{-1/2}$, o que também tem lógica uma vez que são climas quentes e com muita humidade, e onde se verificam poucas variações da temperatura ao longo do dia e também ao longo do ano.

A espessura dos painéis é sempre de 70 mm independentemente de a inércia ser baixa ou alta.

Tabela 49 – Constituição e espessura dos componentes do painel cobertura para cada clima.

Painel Cobertura						
	δ (m)	BSh (Senegal/ Dakar)	Aw (Honduras/ Tegucigalpa)	Bsk (Irão/ Teerão)	Am (Suriname/ Zanderij)	Dfb (Estônia/ Tallinn)
U = 0,075 W/(m²K)	(Camada exterior)					
	Pinho	0,0150				
	Superfície de metal	0,0020				
	Placa de poliuretano	0,3336				
	Superfície de metal	0,0020	X	X	X	X
	Painel de fibra de madeira	0,0150				
	Pinho	0,0150				
	(Camada interior)					
	Espessura total:	0,3826				
	(Camada exterior)					
U = 0,425 W/(m²K)	Pinho	0,0150				
	Superfície de metal	0,0020				
	Placa de poliuretano	0,0481				
	Superfície de metal	0,0020	X			
	Painel de fibra de madeira	0,0150				
	Pinho	0,0150				
	(Camada interior)					
	Espessura total:	0,0971				

Os painéis da cobertura por sua vez também terão um coeficiente de transferência de calor (U) baixo, sendo no entanto o valor estipulado igual a 0,075 W/(m²K). De modo a que o painel da cobertura tenha esse valor total de coeficiente de transferência de calor, é necessário que o isolamento tenha 333,6 mm de espessura e a espessura do painel seja de 382,6 mm.

Relativamente ao clima de savana tropical ou Aw tem-se que para um coeficiente de transferência de calor de 0,425 W/(m²K) que a espessura do isolamento térmico seja de 48,1 mm e a espessura total do painel de 97,1 mm.

Tabela 50 - Constituição e espessura dos componentes do painel do pavimento para cada clima.

Painel Pavimento						
	δ (m)	BSh (Senegal/ Dakar)	Aw (Honduras/ Tegucigalpa)	Bsk (Irão/ Teerão)	Am (Suriname/ Zanderij)	Dfb (Estônia/ Tallinn)
U = 0,10 W/(m²K)	(Camada exterior)					
	Pinho	0,0150				
	Superfície de metal	0,0020				
	Placa de poliuretano	0,2490				
	Superfície de metal	0,0020	X	X	X	X
	Pavimento de madeira	0,0150				
	(Camada interior)					
	Espessura total:	0,2830				
	(Camada exterior)					
	Pinho	0,0150				
U = 0,45 W/(m²K)	Superfície de metal	0,0020				
	Placa de poliuretano	0,0467				
	Superfície de metal	0,0020	X			
	Pavimento de madeira	0,0150				
	(Camada interior)					
	Espessura total:	0,0807				

Tal como no caso do painel da parede exterior, tem-se maioritariamente, painéis do pavimento com um coeficiente de transferência de calor (U) de 0,10 W/(m²K), correspondendo neste caso a uma espessura do isolamento de 249 mm e uma espessura total do painel de 283 mm.

Para o clima de savana tropical (Aw) sendo o coeficiente de transferência de calor de 0,45 W/(m²K), tem-se que a espessura do isolamento necessária é de 46,7 mm e a espessura total do painel é de 80,7 mm.

Tabela 51 – Opções de sombreamento da janela para cada clima estudado.

Sombreamento da janela	Posição	Controlo	BSh (Senegal/ Dakar)	Aw (Honduras/ Tegucigalpa)	BSk (Irão/ Teerão)	Am (Suriname/ Zanderij)	Dfb (Estónia/ Tallinn)
Cortinas escuras	Interior	Solar					X
Estores venezianos	Exterior	Solar	X	X	X	X	

Tabela 52 - Opções de sombreamento local para cada clima estudado.

Sombreamento local	BSh (Senegal/ Dakar)	Aw (Honduras/ Tegucigalpa)	BSk (Irão/ Teerão)	Am (Suriname/ Zanderij)	Dfb (Estónia/ Tallinn)
Pala horizontal (0,5m)					X
Pala horizontal (1,0m)		X			
Pala horizontal + pala vertical (1,0m)			X	X	
Grelha de sombreamento (1,0m) + pala horizontal (1,0m) + pala vertical (1,0m)	X				

Tabela 53 – Soluções de modelos de envidraçados aplicados para cada clima estudado.

Envidraçados	BSh (Senegal/ Dakar)	Aw (Honduras/ Tegucigalpa)	BSk (Irão/ Teerão)	Am (Suriname/ Zanderij)	Dfb (Estónia/ Tallinn)
Dbl LoE (e2=.1) Clr 6mm/13mm Arg		X		X	X
Trp LoE (e2=e5=.1) Clr 3mm/13mm Arg	X				
Trp LoE (e2=e5=.1) Clr 3mm/13mm Cripton			X		

Nas tabelas em cima encontram-se discriminadas as opções de sombreamento das janelas, de sombreamento local das mesmas e os modelos do *DesignBuilder* para o tipo de envidraçado. É importante mencionar que a escolha final de ambos os sistemas de sombreamento, tanto das janelas como o local, foi feita tendo em conta, principalmente, o maior contributo para a redução do consumo energético.

5.11. Resumo e conclusões do capítulo

Efetuada a componente prática deste trabalho foi possível chegar a algumas conclusões finais relativamente às opções de projeto para uma casa modular de tipologia T₂ com 72 m² de área útil para os diferentes climas estudados.

Tabela 54 – Quadro de resumo dos resultados obtidos na análise paramétrica.

Parâmetros		BSh (Senegal/ Dakar)	Aw (Honduras/ Tegucigalpa)	BSk (Irão/ Teerão)	Am (Suriname/ Zanderij)	Dfb (Estónia/ Tallinn)
Coeficiente de transferência de calor	-	X	X	X	X	X
	+	-	-	-	-	-
Fração envidraçada	-	X	X	X	X	X
	+	-	-	-	-	-
Inércia térmica	-	-	-	-	X	-
	+	X	X	X	-	X
Refletividade exterior (cor)	-	-	-	-	-	X
	+	X	X	X	X	-

Após o estudo paramétrico foi possível concluir que é mais eficiente em termos de consumo energético, para a maior parte dos climas estudados, painéis das paredes exteriores e do pavimento com um coeficiente de transferência de calor (U) de 0,15 W/(m²K). O que neste caso implica que o coeficiente de transferência de calor da cobertura seja de 0,125 W/(m²K).

Outro parâmetro estudado refere-se à percentagem de envidraçados tendo-se concluído que é preferível que esta seja baixa, neste caso de 15%, para todos os climas estudados, concluindo-se também que é um dos parâmetros que mais contribui para a redução do consumo energético.

Relativamente aos painéis das paredes interiores conclui-se que paredes internas com material com inércia elevada de 4190 kJm⁻²K⁻¹s^{-1/2} favorecem os climas semiárido quente e semiárido frio (BSh e BSk), o clima de savana tropical (Aw), assim como o clima continental de verão quente (Dfb). O oposto acontece para o clima de monção tropical (Am) em que requer paredes interiores com inércia térmica baixa de 7,10 kJm⁻²K⁻¹s^{-1/2}.

Por fim, em relação à refletividade da camada exterior da cobertura, conclui-se que esta é maioritariamente preferível que seja elevada, exceto para o clima continental de verão quente (Dfb), o que é compreensível visto que é o clima mais frio dos

climas estudados e por isso, uma cobertura cuja camada exterior tenha baixa refletividade favorece a redução das necessidades de aquecimento que predominam neste clima, ao inverso das necessidades de aquecimento que são praticamente nulas.

Tabela 55 – Resumo dos resultados finais após otimização para os diferentes climas.

Climas	Necessidade de aquecimento (kWh/(m² ano))	Necessidade de arrefecimento (kWh/(m² ano))	Energia total consumida (kWh/(m² ano))	Energia primária total consumida (kWh/(m² ano))	Desconforto anual (horas)
BSh (Senegal/ Dakar)	0,00	33,71	66,81	173,71	27,14
Aw (Honduras/ Tegucigalpa)	0,00	56,57	89,67	233,14	124,43
BSk (Irão/ Teerão)	2,88	12,70	48,68	126,56	6,53
Am (Suriname/ Zanderij)	0,00	52,00	85,10	221,26	105,63
Dfb (Estónia/ Tallinn)	13,67	0,83	47,60	95,20	71,29

Na Tabela 55 encontra-se o quadro de resume com os valores finais relativos aos consumos energéticos anuais e horas de desconforto para a casa modular para os diferentes climas, após realizada a otimização. A ter em atenção que os valores de energia total consumida incluem as necessidades de aquecimento, as de arrefecimento, as necessidades de água quente sanitária (AQS) que neste caso são de 6,32 kWh/(m²ano), a eletricidade doméstica, cujo consumo é de 17,27 kWh/(m²ano) e o consumo da iluminação, que após a otimização, onde se trocou lâmpadas T8 para LED, passou de 12,94 kWh/(m²ano) para 9,51 kWh/(m²ano), reduzindo cerca de 27% do consumo energético anual na iluminação.

Conclui-se assim que, para o clima Dfb, nomeadamente para a Estónia, conseguiu-se cumprir com os requisitos para uma Casa Passiva, tanto ao nível das necessidades de aquecimento e de arrefecimento (inferiores a 15 kWh/(m²ano) cada), como ao nível do consumo de energia primária que é inferior aos 120 kWh/(m²ano) estipulados, atingindo-se um valor final de 95,20 kWh/(m²ano) com um fator de energia primário de 2,0, em vigor na Estónia.

Para os restantes países, uma vez que os fatores de energia primária são desconhecidos, considerou-se ser necessário a aplicação do fator de energia

primária da Alemanha que é cerca de 2,6, sendo o valor para este fator dos mais elevados. A aplicação deste fator no cálculo da energia primária total consumida faz com que a casa modular para o clima semiárido frio (BSk), neste caso do Irão, deixe de ser considerada uma Casa Passiva, cumprindo com os requisitos das necessidades de aquecimento e de arrefecimento que são inferiores a 15 kWh/(m²ano), neste caso de 2,88 kWh/(m²ano) e 12,70 kWh/(m²ano), respetivamente, não cumprindo no entanto, com os 120 kWh/(m²ano) relativos ao total de energia primária consumida que neste caso é de 126,56 kWh/(m²ano).

Para climas mais quentes como o semiárido quente (BSh), o clima de savana tropical (Aw) e o clima de monção tropical (Am), revelou-se ser bastante complicado atingir os requisitos da Casa Passiva que foram concebidos a pensar em climas frios, ficando-se muito longe dos valores pretendidos, em particular ao nível das necessidades de arrefecimento que são muito altos os valores obtidos.

Conclui-se também que uma correta abordagem ao cálculo da energia primária é fundamental assim como o conhecimento dos fatores de energia primária de cada país de modo a que exista um maior rigor no cálculo da energia primária. A falta de consenso na metodologia de cálculo, a constante evolução destes fatores e o desconhecimento dos valores destes fatores para os países em estudo, levantou, de certa forma, um problema na avaliação do desempenho energético neste trabalho.

6. Proposta final

6.1. Sumário

Neste capítulo é apresentada a proposta final para o projeto da casa modular unifamiliar.

São abordados também um conjunto de escolhas técnicas para a casa modular cuja implementação é abordada de forma geral. Estas pretendem colmatar alguns aspetos que não tenham sido analisados relativamente às especialidades técnicas da casa.

Da pesquisa efetuada sabe-se que o enquadramento legal de uma casa pré-fabricada, de uma casa de madeira ou de uma casa modular é, pelo menos em Portugal, o mesmo que de uma casa de construção dita convencional. O licenciamento é obrigatório e as leis são comuns, diferenciando apenas o método de construção e não a construção em si (129).

A Licença de Construção tem como objetivo configurar a construção ou a obra com as normas técnicas de edificação e, também, com os instrumentos de planeamento territorial que porventura existam.

O pedido de licenciamento de construção tem que ser processualmente enquadrado conforme o local em que se integra e deve ser instruído com o Projecto de Arquitetura, que inclui: memória descritiva, plantas, cortes, alçadas e pormenores de execução. Este será apreciado tendo em conta, não só, a conformidade do mesmo com o(s) instrumento(s) de planeamento territorial existente(s) mas, também, com outras normas legais e regulamentares aplicáveis e com o aspeto exterior dos edifícios e a sua inserção no ambiente urbano e na paisagem. Aprovado o Projecto de Arquitetura, deverão ser apresentados os projetos de especialidades (129).

6.2. Especialidades

6.2.1. Fundações

O termo fundação é utilizado na engenharia civil para designar as estruturas responsáveis por transmitir as cargas provenientes da construção ao solo, utilizando-se geralmente, várias fundações seguidas para esse fim. Existem diversos tipos de fundação e são projetadas levando em consideração a carga que recebem e o tipo de solo onde vão ser construídas.

De acordo com Artigo 18.º do capítulo II do RGEU as fundações dos edifícios convém que sejam estabelecidas sobre terreno estável e suficientemente firme, por natureza ou por consolidação artificial, para suportar com segurança as cargas que lhe são transmitidas pelos elementos da construção, nas condições de utilização mais desfavoráveis.

A montagem da casa modular no local de obra necessita de fundações, para a acomodação da mesma e para a criação de uma barreira física de separação com o terreno, que deverá ser estável, compacto, plano e livre do risco de inundação, ou de outros riscos de ordem natural.

Este trabalho não contempla um estudo aprofundado ou um projeto para a fundação da casa modular uma vez que não faz parte dos objetivos deste trabalho, sendo apenas mencionadas algumas opções de projeto possíveis de serem aplicadas.



Figura 121 – Exemplo de uma laje de betão compactado (130).

Grande parte dos projetos analisados, que contemplam construção modular ou pré-fabricada, preveem na sua maioria a realização de ensoleiramento geral com recurso a betão armado.

A utilização generalizada do betão e o uso do cimento Portland como ligante de excelência acarreta, no entanto, um elevado impacto ambiental, devido à extração das matérias-primas não-renováveis e pela quantidade de carbono emitido durante a sua produção (131).

Esta poderia ser uma opção, não fosse um dos critérios deste projeto a utilização de materiais o máximo possível sustentáveis.



Figura 122 – Exemplo de uma fundação de madeira (132).

A possível solução seria a criação de uma fundação simples e rápida de construir, cuja estrutura fosse em madeira e com formato retangular, que criasse uma barreira entre a casa modular e o terreno e que promovesse a ventilação e a proteção contra a humidade do solo.

De forma a reduzir a mão-de-obra e o tempo de execução, a fundação terá a mesma secção ao longo do seu comprimento, e a sua dimensão será estandardizada de acordo com as dimensões do módulo.

6.2.2. Estabilidade

Nos pontos seguintes são mencionados pormenores relacionados com os diversos elementos modulares que constituem a casa modular. Esta possui um formato retangular e apresenta como dimensões normalizadas, para a Tipologia T₂, um espaço útil interno que não varia, com 12 metros de comprimento, uma largura de 6 metros e uma altura de 2,40 metros.

Para os climas BSh, BSk, Am e Dfb a casa modular possui um comprimento de 12,56 metros, uma largura de 6,56 metros e uma altura de 2,98 metros, uma vez que as paredes externas possuem uma espessura maior. Para o clima Aw a casa possui um comprimento de 12,16 metros, uma largura de 6,16 metros e uma altura de 2,49 metros.

A projeção de vários elementos construtivos separados e de forma modular, possibilitam o seu transporte e montagem *onsite*, ou caso seja necessário, o transporte da casa modular é possível de ser realizado por camião ou reboque, uma vez que as suas dimensões possibilitam o seu transporte num contentor marítimo.

Os painéis serão providos de encaixe próprio e aplicados dentro de perfis galvanizados do tipo U de modo a garantir a rigidez do conjunto e a constituir uma estrutura autoportante, que irá compor o módulo. Esta será assente sobre uma fundação de madeira, na qual se efetuarão as ligações às infraestruturas existentes (águas, eletricidade e saneamento).

A conjugação das várias peças foi realizada com a intenção de conferir rigidez ao conjunto, facilidade nas ligações dos vários elementos modulares, assim como o melhor aproveitamento do material, garantindo um espaço interior de acordo com as normas legais.

Como se pôde observar no capítulo anterior, as soluções construtivas para as paredes exteriores, pavimento e cobertura, relativamente ao tipo de materiais que os constituem, não varia de clima para clima. Relembra-se, no entanto que, o único aspeto que varia diz respeito à espessura do poliuretano, o isolamento térmico.

Nos pontos seguintes são mencionados, mais em pormenor, aspetos relativos ao projeto de estabilidade, desde aos painéis que constituem as paredes exteriores, interiores, cobertura e pavimento às janelas, envidraçados e portas.

6.2.2.1. Paineis parede exterior

Construído com recurso a painéis metálicos do tipo *sandwich* para fachada, com núcleo em poliuretano. Neste caso em concreto, o material do núcleo é constituído por placas ou blocos de poliuretano de densidade 35 kg/m^3 com 2400 mm de comprimento e 2000 mm de largura, e em cada um dos lados, é composto por uma chapa de aço galvanizado com as mesmas dimensões e com 2 mm de espessura. Nas casas modulares para os climas BSh, BSk, Am e Dfb, uma vez que as paredes exteriores necessitam de um coeficiente de transferência de calor de $0,10 \text{ W/(m}^2\text{K)}$, isto implica uma espessura de isolamento mais elevada, neste caso com uma espessura de 251 mm, o que corresponde a utilizar quatro placas de poliuretano de $2000 \times 1000 \times 100 \text{ mm}$ e quatro placas de $2000 \times 1000 \times 55 \text{ mm}$.

Para o clima Am, uma vez que o coeficiente de transferência de calor é de $0,45 \text{ W/(m}^2\text{K)}$, e consequentemente uma espessura de isolamento de cerca de 48,9 mm, para este valor de espessura é possível optar-se por três placas de poliuretano de $2000 \times 1000 \times 50 \text{ mm}$.

Pelo interior, o painel é revestido por duas placas de pladur de $2400 \times 1000 \text{ mm}$ com 10 mm de espessura, dispostas lado a lado de modo a perfazer os 2000 mm de largura do painel.

O acabamento exterior do painel é constituído por um revestimento mural com painel ou tábuas de madeira em pinho com uma espessura de 15 mm.

6.2.2.2. Paineis parede interior

Na constituição dos painéis das paredes interiores tem-se que, estes são constituídos principalmente por duas placas de pladur com 2400 mm de comprimento e 1000 mm de largura, dispostas paralelamente.

O material colocado entre as duas placas de pladur, para os climas BSh, BSk e Dfb deverá ser água, uma vez que possui uma inércia térmica elevada, cerca de $4190 \text{ kJm}^{-2}\text{K}^{-1}\text{s}^{-1/2}$.

No caso dos climas quentes e húmidos, como Aw e Am, o interior do painel deverá ser constituído por placas de fibra mineral/lã que possui uma inércia térmica baixa, cerca de $7,10 \text{ kJm}^{-2}\text{K}^{-1}\text{s}^{-1/2}$, ideal para este tipo de climas.

6.2.2.3. Painel cobertura

Como já antes mencionado existem três opções de dimensões para o painel da cobertura. Painéis com um comprimento e uma largura de 2000 mm, considerados os painéis centrais e possíveis de ligar a outros quatro painéis; os painéis das extremidades, cujo comprimento é de 2000 mm e a largura de 2300 mm, sendo possível de ligar a outros três painéis; e por fim, os painéis que perfazem os cantos da cobertura, que têm um comprimento e uma largura de 2300 mm e que apenas se podem ligar a outros dois painéis. Apesar das suas diferentes dimensões, a solução construtiva é a mesma para as três opções de painéis mencionadas.

Mais uma vez, os componentes centrais do painel é o poliuretano, com duas chapas de aço de cada lado do poliuretano.

Para climas como BSh, BSk, Am e Dfb o coeficiente de transferência de calor da cobertura é de $0,075 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, o que significa uma espessura do isolamento de cerca de 333,6 mm. No entanto, como existem três tipos de painéis para a cobertura com dimensões diferentes, para cada um destes tipos a quantidade de placas de poliuretano é diferente. Para painéis de 2000x2000 mm necessitam-se de seis placas de poliuretano com 2000x1000x100, empilhadas em três placas e colocadas lado a lado perfazendo um quadrado de 2000x2000x300 mm. Por fim colocar-se-iam mais duas placas de 2000x1000x35 mm em paralelo.

Para painéis da cobertura de 2000x2300 mm tem-se que seria necessário na mesma seis placas de 2000x1000x100 mm e cinco de 2000x1000x35 mm.

Nos painéis com 2300x2300 mm de dimensão, seria necessário seis placas de 2000x1000x100 mm e oito placas de 2000x1000x35 mm não existindo qualquer desperdício de material neste caso.

Para o clima Aw, o coeficiente de transferência de calor é de 0,425 W/(m²K) e a espessura do poliuretano é de 48,1 mm, utilizando-se neste caso placas comerciais de 2000x1000x50 mm. Nos painéis da cobertura de 2000x2000 mm utilizar-se-iam dois painéis deste tipo. Para os outros dois tipos utilizar-se-iam três painéis, sobrando algum material.

No lado interior, colocar-se-iam quatro painéis de fibra de madeira comerciais com 600 de comprimento e 2000 mm de largura e com 15 mm de espessura, sobrando, deste modo, por cada painel do tipo 2000x2000 mm, um painel de fibra de madeira de 400x2000 mm.

No caso dos painéis do tipo 2000x2300 mm, utilizam-se também quatro painéis de fibra de madeira com as dimensões comerciais, sobrando neste caso um painel com 100x2000 mm e 15 mm de espessura. Para os painéis que constituem os cantos e cujas dimensões são de 2300x2300 mm, tem-se que utilizar-se-iam oito painéis de fibra de madeira com 600 mm de comprimento e 1200 mm de largura. Ou seja, utilizando-se estes painéis comerciais sobram dois painéis com 100x1200 mm e três painéis com 600x100 mm.

Tal como nos painéis das paredes exteriores, o acabamento exterior também é em madeira de pinho.

6.2.2.4. Painel pavimento

No caso dos painéis que formam o pavimento, tal como no caso da cobertura também aqui existem três tipos de painéis com a mesma solução construtiva entre eles mas com dimensões diferentes. As dimensões são as mesmas dos painéis da cobertura, ou seja, 2000x2000 mm, 2000x2300 mm 2300x2300 mm.

Para todos os climas o único aspeto que varia é de fato a espessura do isolamento térmico que mais uma vez é o poliuretano.

Para os climas BSh, BSk, Am e Dfb o coeficiente de transferência de calor é de $0,10 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, sendo a espessura do isolamento térmico de 249 mm. Nos painéis do pavimento com $2000 \times 2000 \text{ mm}$ seriam necessárias quatro placas de $2000 \times 1000 \times 100 \text{ mm}$ e dois de $2000 \times 1000 \times 50 \text{ mm}$, não existindo desperdício de material. Nos painéis com $2000 \times 3000 \text{ mm}$ seriam necessárias quatro placas de $2000 \times 1000 \times 100 \text{ mm}$ e quatro de $2000 \times 1000 \times 50 \text{ mm}$. Nos painéis de $2300 \times 2300 \text{ mm}$ utilizar-se-iam quatro placas do tipo $2000 \times 1000 \times 100 \text{ mm}$ e seis do tipo $2000 \times 1000 \times 50 \text{ mm}$.

No caso do clima Aw, cujo coeficiente de transferência de calor é de $0,45 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ e a espessura do poliuretano é de 46,7 mm. Nos painéis de $2000 \times 2000 \text{ mm}$ seriam apenas necessárias duas placas de $2000 \times 1000 \times 50 \text{ mm}$. Nos outros dois casos seriam necessárias três placas com as mesmas dimensões.

A camada exterior do painel seria em madeira de Pinho, tal como nos painéis da parede exterior e no painel da cobertura.

A camada interior e que forma o pavimento interior é em madeira e tem 15 mm de espessura.

6.2.2.5. Caixilharia e sombreamento

Para todos os climas estudados, no projeto optou-se por colocar caixilharia exterior de alumínio. O acabamento seria em lacado com imitação de madeira, para janela de alumínio, de correr simples, de $1800 \times 1200 \text{ mm}$, série alta, formada por três folhas, com perfis providos de rutura de ponte térmica, e com pré-aro.

Teria também uma caixa de estore térmica incorporada (monobloco), com persiana de lâminas de PVC, com acionamento manual, com fita e recolhedor.

Relativamente ao sombreamento das janelas e local, estes como já referido no capítulo anterior, são diferentes de clima para clima.

6.2.2.6. Envidraçados

A melhor solução técnica para os envidraçados foi conseguida sempre com o objetivo de providenciar conforto térmico aos ocupantes no interior da casa e também de diminuir o consumo energético, como visto no capítulo anterior.

Para os climas Aw, Am e Dfb é preferível utilizar vidro duplo com 6 mm de Cloro e 13 mm de Árgon. Para o clima Dfb com esta solução de envidraçados os custos seriam mais baixos e cumpriria na mesma as metas energéticas e de conforto para ser considerada uma Casa Passiva.

No caso do clima BSh, optou-se por colocar vidros triplos com 3 mm de Cloro e 13 mm de Árgon.

Por fim, para o clima BSk, optou-se por vidros triplos com 3 m de Cloro e 13 mm de Cripton, sendo esta uma solução bastante eficiente mas bastante dispendiosa.

6.2.2.7. Portas

a) Porta exterior

A porta exterior teria uma altura de 2025 mm e uma largura de 895 mm. O pré-aro e o aro da porta seriam montados *offsite* logo de partida no painel da parede exterior especial para alojar uma porta exterior. Para tal seria necessário uma altura de obra de 2080 mm e uma largura de obra de 908 mm (133), de modo a acoplar o pré-aro e o aro.

b) Portas interiores

As três portas interiores, pré-pintadas, teriam uma altura de 2000 mm e uma largura de 800 mm. Estas seriam montadas em painéis de paredes interiores específicos para acoplar uma porta interior. O aro e o pré-aro seriam montados mais uma vez *offsite*, enquanto que, a colocação da porta em si dar-se-ia depois de levantada a estrutura da casa.

O pré-aro é de aço de 2 mm, lacado resistente à corrosão e aos agentes atmosféricos uma vez que no processo de montagem não é utilizada soldadura. A sua fixação é feita através das 8 patilhas de aço embutidas ou por aparafusamento, sendo esta dotada de suportes para aparafusamento da porta (134).

O aro, constituído por aço galvanizado de 1,5 mm, poderia ser lacado à cor *standard*, à cor pretendida pelo cliente, ou em chapa imitando a madeira pretendida (134).

6.2.3. Térmica e climatização

A implementação de sistemas de climatização é de grande importância, especialmente para climas mais adversos. Consoante o tipo de clima as especificações dos sistemas de climatização variam, sendo afinado para as características do local de implementação da casa.

Como já mencionado no capítulo anterior, o sistema considerado foi do tipo *multi-split*, composto por uma unidade exterior e quatro unidades no interior de cada espaço a condicionar (quartos, Sala e cozinha e WC).

Na tabela em baixo, é possível observar um quadro de resumo com as especificações dos sistemas de climatização de acordo com o tipo de clima estudado.

Tabela 56 – Quadro de resumo das especificações dos sistemas de climatização para cada clima estudado.

Especificações	BSh (Senegal/ Dakar)	Aw (Honduras/ Tegucigalpa)	Bsk (Irão/ Teerão)	Am (Suriname/ Zanderij)	Dfb (Estónia/ Tallinn)
Arrefecimento	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Combustível para Arrefecimento	Eletricidade	Eletricidade	Eletricidade	Eletricidade	Eletricidade
COP de Arrefecimento	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26
Aquecimento	Não	Não	Sim	Não	Sim
Combustível para Aquecimento	-	-	Eletricidade	-	Eletricidade
COP de Aquecimento	-	-	4,0	-	4,0
Ventilação mecânica	Não	Não	Sim	Não	Sim
Economizador (Free cooling)	-	-	Bulbo seco diferencial	-	Bulbo seco diferencial
Recuperador de calor	-	-	Sim	-	Sim
Eficácia do recuperador de calor	-	-	85%	-	85%

Na Tabela 56 encontram-se discriminadas as especificações dos sistemas de climatização implementados de acordo com o tipo de clima.

Para todos os climas são existe a necessidade de arrefecimento, no entanto, para o caso do aquecimento apenas os climas BSk e Dfb têm essa necessidade.

A ventilação mecânica revelou-se ser fundamental para que existisse conforto térmico para os climas BSk e Dfb, tendo-se também implementado um economizador e um recuperador de calor com 85% de eficácia para um consumo energético inferior.

6.2.4. Acústico

“O silêncio é um bem precioso que convém manter no interior das habitações” (135). A consciência deste facto levou a que fossem feitas legislações relativas ao conforto acústico e neste campo a lã de rocha tem-se apresentado como um material com elevada eficácia no que diz respeito à absorção acústica, cumprindo simultaneamente as exigências térmicas mais rigorosas.

Sabendo que este é um material de excelência para o isolamento térmico e acústico, optou-se então por aplicar nos painéis das paredes internas duas placas de lã de rocha sem revestimento com 35x0,60x0,05 metros (135).

Nas paredes exteriores, cobertura e pavimento utilizou-se placas de poliuretano com densidade de 35 kg/m³ que para além de cumprir com a função de isolante térmico contribui também para o isolamento acústico.

6.2.5. Saneamento e abastecimento de água

Alguns dos materiais mais utilizados nas redes de abastecimento são de material plástico, mais propriamente o PVC PN10 e PVC-U, assim como os tubos de polietileno, de alta (PEAD) e baixa densidade (PEBD). Atualmente a utilização do PVC generalizou-se quer ao nível do abastecimento de água, quer também ao nível das águas residuais e pluviais. Por sua vez, as tubagens PEAD e PEBD, devido à sua capacidade de resistência às pressões é utilizado principalmente no

abastecimento de água fria (136). A canalização para água quente e fria é executada no interior dos painéis, em tubos de aço inox com as dimensões regulamentares. Quanto ao saneamento, este é feito em PVC.



Figura 123 – Exemplo de montagem da rede de abastecimento em PEBD nos painéis (137).

6.2.6. Instalação elétrica

Tal como a rede de saneamento e de abastecimento de água, a instalação da rede elétrica é feita no interior dos painéis.

Os fios terão as secções regulamentadas e os circuitos na casa serão independentes para as lâmpadas e para as tomadas.

6.3. Custos

Para auxiliar na obtenção de parte dos custos associados ao projeto foi utilizado o *CYPE Ingenieros, S.A* (138), um *software* para engenharia e construção, o qual possui um gerador de preços que se mostrou ser bastante útil.

Tabela 57 – Preço base e energia anual consumida para casas modelo de tipologia T₂ de acordo com o tipo de clima.

Climas	Preço base (€)	Energia anual consumida (kWh)
BSh (Senegal/ Dakar)	33.414,4	4810,51
Aw (Honduras/ Tegucigalpa)	20.828,7	6669,10
Bsk (Irão/ Teerão)	34.433,6	3504,74
Am (Suriname/ Zanderij)	27.275,4	6127,45
Dfb (Estónia/ Tallinn)	25.461,3	3427,15

Os preços mencionados na Tabela 57 são para uma casa unifamiliar de tipologia T₂ com 72 m² de área útil. Estes incluem o aluguer do contentor, os materiais construtivos, os acabamentos efetuados, as portas, as janelas, as tubagens para a rede de água e esgotos e rede elétrica, estes dois últimos aspetos são considerados uma vez que são implementados desde raiz no interior dos painéis. No preço não estão incluídas loiças sanitárias, armários de cozinha, eletrodomésticos e iluminação, uma vez que a instalação dos mesmos seriam serviços contratados, e independentes ao fabrico dos painéis da casa. No Anexo IV encontram-se discriminados os materiais e componentes que constituem as casas para os diferentes climas estudados e os custos associados aos mesmos.

6.4. Discussão da solução proposta

a) Clima BSh – Senegal/ Dakar

Como se pode observar na Figura 124, para o clima semiárido quente ou BSh, é estritamente necessário que a casa seja provida de diversos mecanismos de sombreamento e que a espessura do isolamento seja elevada, tendo estes um grande impacto tanto ao nível do consumo energético como ao nível do conforto térmico.

Devido aos aspetos mencionados esta acaba por ser uma das soluções mais caras, sendo o preço base estimado cerca de 33.414,4 euros.

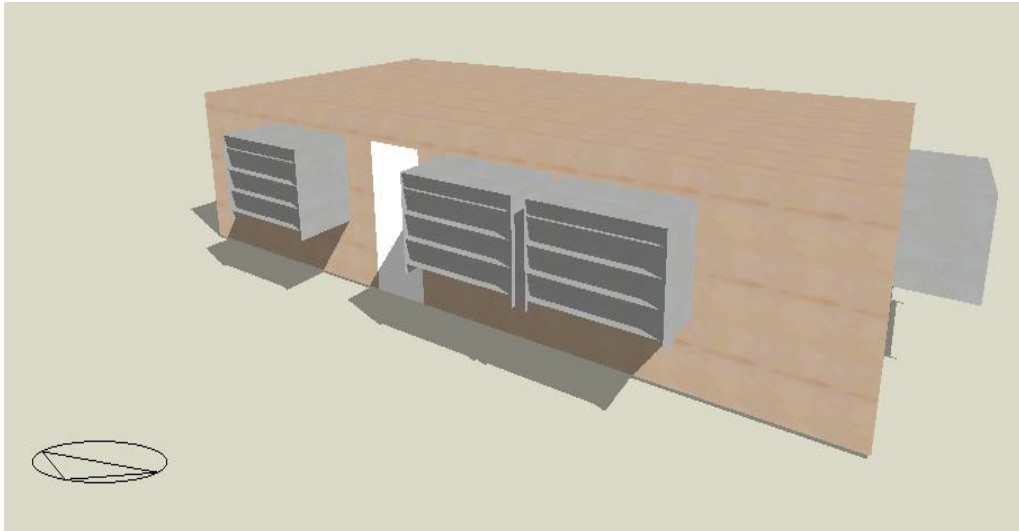


Figura 124 – Proposta final para o clima BSh.

b) Clima Aw – Honduras/ Tegucigalpa

A solução apresentada para o clima de savana tropical ou Aw ao nível da envolvente opaca é o único que difere, possuindo uma espessura do isolamento térmico bastante baixa.

Ao nível dos mecanismos de sombreamento, esta solução é dotada de palas horizontais e verticais, suficientes para manter o conforto térmico no interior da casa. Por estes dois motivos mencionados esta é a solução cujo preço é mais baixo, cerca de 20.828,7 euros.

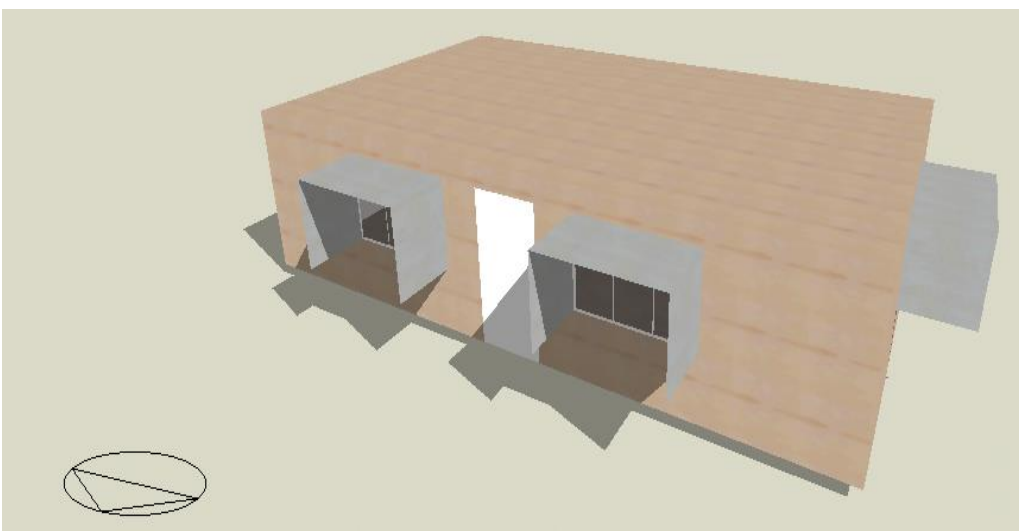


Figura 125 - Proposta final para o clima Aw.

c) Clima BSk – Irão/ Teerão

A solução proposta para o clima semiárido frio ou BSk é a mais cara, devido à elevada espessura do isolamento e especialmente devido ao vidro utilizado, neste caso, vidro triplo com gás cripton no interior, numa tentativa de baixar o máximo possível o consumo energético, não atingindo por pouco o limite estabelecido para ser considerada uma Casa Passiva.

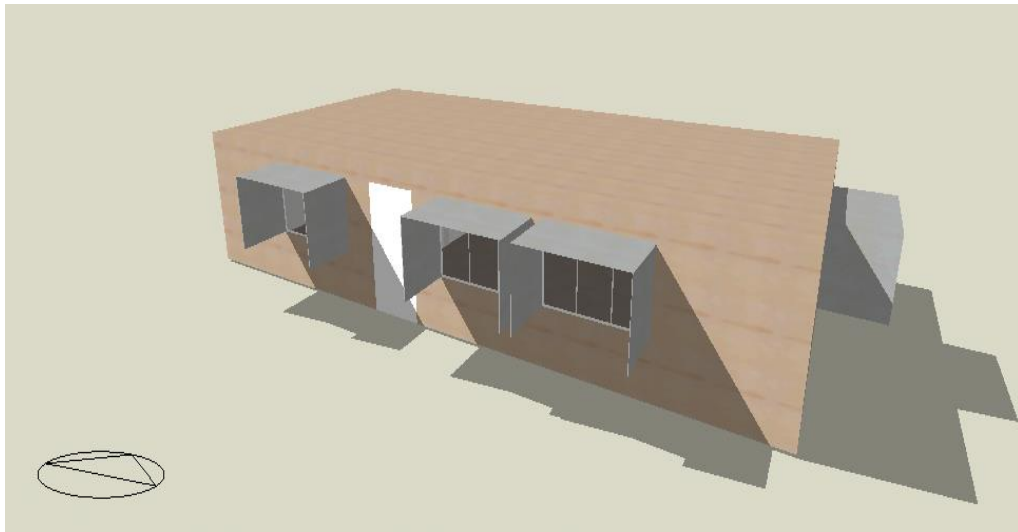


Figura 126 - Proposta final para o clima BSk.

d) Clima Am – Suriname/ Zanderij

No caso do clima de monção tropical ou Am, estima-se que o custo base estimado para a solução final ronde os 27.275,4 euros, sendo a terceira mais barata. A casa para este clima quente e húmido necessita de palas horizontais e verticais, ambas com 1 metro de projeção contribuindo para que exista durante todo o ano temperaturas de conforto no interior da casa.

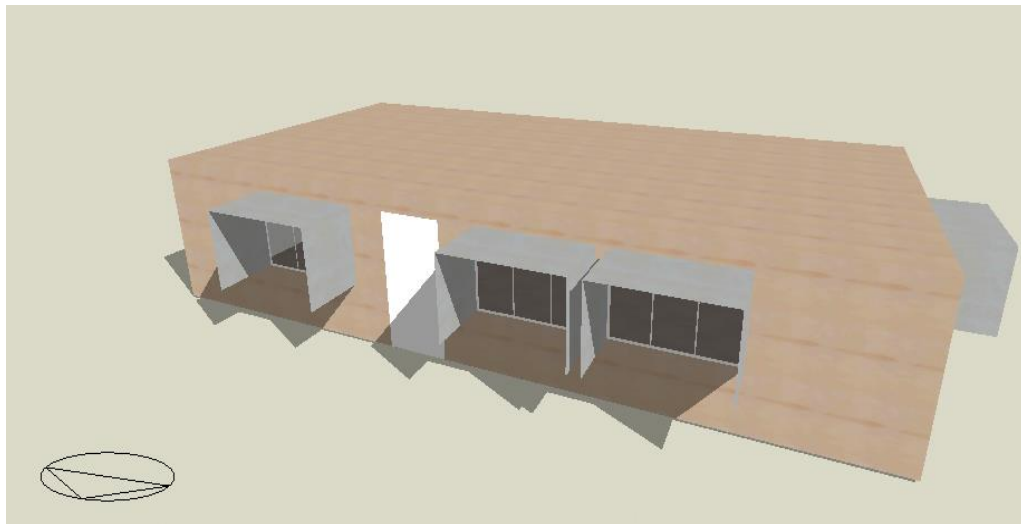


Figura 127 - Proposta final para o clima Am.

e) Clima Dfb – Estónia/ Tallinn

A última solução estudada refere-se a uma casa para o clima continental de verão quente ou Dfb, onde conseguiu-se atingir as metas para que seja considerada uma Casa Passiva.

Esta solução seria a mais barata não fosse a elevada espessura de isolamento necessária e que faz aumentar o preço. No entanto, ao nível dos mecanismos de sombreamento foi apenas necessário a colocação de uma pala horizontal de 0,5 metros, evitando parte da incidência solar nos meses mais quentes e o contrário nos meses frios.

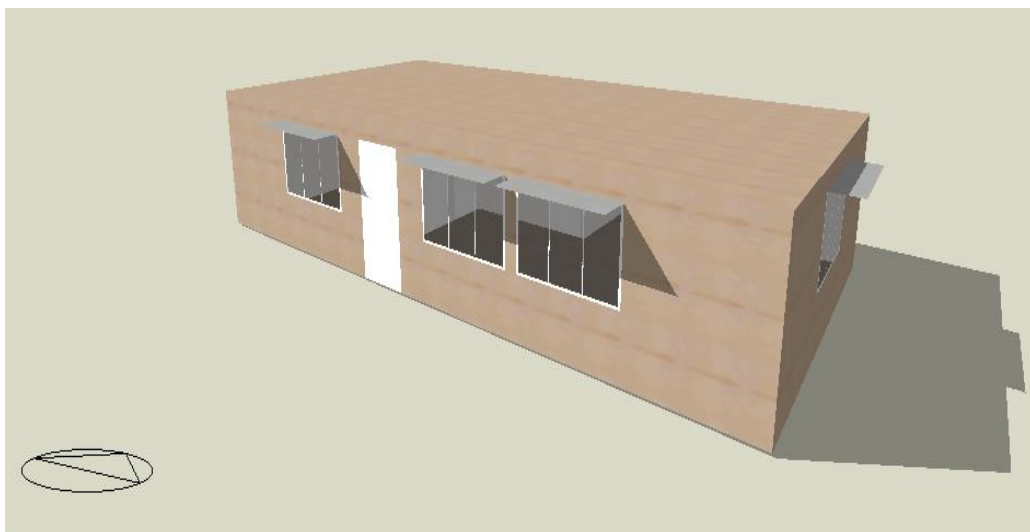


Figura 128 - Proposta final para o clima Dfb.

6.5. Resumo e conclusões do capítulo

A solução técnica considerada neste projeto, teve como principais linhas de orientação a projeção de uma casa modular de tipologia T₂ com dimensões normalizadas, passível de ser transportada e montada *onsite*.

A projeção de elementos construtivos separados e de forma modular, possibilitam o seu fácil transporte e montagem, sendo o transporte da casa modular possível de ser realizado por caminhão, reboque ou contentor marítimo uma vez que as suas dimensões assim o permitem. A conjugação dos vários painéis foi realizada com a intenção de conferir rigidez ao conjunto, facilidade nas ligações dos vários elementos modulares, assim como o melhor aproveitamento do material, garantindo um espaço interior de acordo com as normas legais. As opções consideradas passaram pela tentativa de utilização de materiais, o máximo possível sustentáveis, tal como a madeira e seus derivados, na elaboração da fundação e da estrutura em si, colocando-se de parte a utilização do betão ou de perfis metálicos.

Tentou-se também evitar desperdícios de material, fazendo-se escolhas racionais na escolha das dimensões dos materiais comerciais existentes no mercado e reutilizando os materiais que restavam em outros elementos construtivos.

Está prevista a ligação a redes de abastecimento de água, drenagem de águas residuais domésticas, fornecimento de energia elétrica pelo que estas infraestruturas deverão ser preparadas antes do início dos trabalhos.

Foi também feita uma estimativa relativamente ao custo base de cada casa para cada clima estudado, assim como a energia anual consumida.

Concluiu-se que para uma casa para o clima Aw que esta possui um preço base mais baixo devido, especialmente, devido à menor quantidade de poliuretano, sendo a espessura cerca de seis vezes menor comparadamente com a espessura do isolamento térmico necessário para as casas dos restantes climas.

Para o clima BSh a casa é mais cara especialmente devido aos vários modelos de mecanismos de sombreamento que acabam por encarecer a solução final.

No entanto, para todos os climas verifica-se que, tendo-se apenas em consideração, os materiais básicos necessários para a construção dos diversos

painéis, que foi possível obter cinco produtos diferentes com preços bastante inferiores aos 50.000 euros máximos estipulados no estudo do produto.

Os preços entre as cinco soluções globais existentes variam ligeiramente conforme as diferentes necessidades técnicas, sendo no entanto, a diferença entre a solução mais dispendiosa e a mais barata de cerca de 14.000 euros.

7. Conclusões e trabalhos futuros

7.1. Conclusões

O principal objetivo do presente trabalho consistiu no desenvolvimento do projeto e do processo de fabrico de um módulo habitacional unifamiliar, aplicando os princípios da engenharia mecânica. Pretendeu-se, através das ferramentas normalmente utilizadas no desenvolvimento do produto e na térmica de edifícios, otimizar o processo de desenvolvimento do projeto. Com base nestas ferramentas, pretendeu-se projetar um módulo que cumprisse com os níveis de conforto térmico adequados e de eficiência energética, aplicando-se técnicas passivas, com principal foco no estudo da envolvente do módulo.

Paralelamente, foi feito um estudo para os cinco climas com maior densidade populacional, com o objetivo de estudar a influência dos mesmos nas características da envolvente da casa modular.

De acordo com a pesquisa bibliográfica efetuada concluiu-se que conceito de construção pré-fabricada remota à época do colonialismo britânico e que a partir daí novas técnicas relativas a este tipo de construção foram surgindo. Com a Revolução Industrial na Inglaterra, em meados do século XVIII, e sua expansão, foi possível a produção em série de elementos construtivos pré-fabricados de forma rápida. Ao longo do século XX foram feitas diversas tentativas no sentido de desenvolver protótipos de casas pré-fabricadas para produção em massa tendo-se obtido pouco sucesso. Atualmente existem diversas soluções, sendo cada vez mais os arquitetos e os construtores que aderem a este tipo de construção, existindo também uma maior preocupação ao nível da segurança, do desperdício de material, assim como do impacto sobre o meio ambiente. No entanto, apesar das vantagens evidentes, existentes na construção pré-fabricada do tipo modular, este método de construção ainda apresenta algumas barreiras, por exemplo, associadas ao transporte. De modo a combater esta questão concluiu-se que o melhor sistema pré-fabricado a aplicar seriam estruturas em painel.

Posto isto, passou-se à análise de critérios e constrangimentos associados ao projeto o que permitiu concluir, nomeadamente quais os climas com maior densidade populacional e onde, para os quais, existiria um mercado possivelmente mais abrangente, tendo-se concluído que existem cinco climas para os quais seria interessante estudar o desempenho higró-térmico da casa modular. Em concreto, os climas BSh (clima semiárido quente), Aw (clima de savana tropical), BSk (clima semiárido frio), Am (clima de monção tropical) e Dfb (clima continental de verão quente). Concluiu-se também que o estudo relativo às dimensões mínimas estipuladas pelo RGEU e o estudo relativo ao tipo de transporte e logística foram essenciais para se chegar às possíveis dimensões dos painéis, do número de painéis possíveis de serem transportados e consequente as dimensões da casa modular.

A aplicação do método do Desdobramento da Função Qualidade (QFD) veio-se a provar bastante útil no processo de desenvolvimento do produto casa modular, uma vez que auxiliou na competitividade global do produto.

Com a aplicação deste método, em concreto, da matriz qualidade, concluiu-se que os requisitos do cliente a serem especialmente valorizados aquando o desenvolvimento do projeto deveriam ser que a casa fosse fácil de transportar, fácil de construir/montar, termicamente confortável, resistente, estável, durável e sustentável. O contrário relativamente a aspetos como os espaços interiores, a disposição interior e o ser confortável a nível sonoro.

Quanto às especificações do produto, de modo a cumprir com os requisitos do cliente, consideraram-se prioritários aspetos como o tipo de estrutura que constituiu a casa, a percentagem de envidraçados, o número de elementos construtivos, o preço, a resistência do material da estrutura, o isolamento térmico e a configuração do sistema AVAC.

Resultante da matriz do produto obteve-se que a priorização do desenvolvimento do produto passava por dar mais importância a aspetos como os tipos de materiais a considerar para as paredes exteriores, pavimento e cobertura, assim como as dimensões/volume do pavimento e da cobertura. Noutro nível de priorização obteve-se aspetos como o peso da cobertura e das paredes exteriores, as

dimensões/volume dos painéis das paredes exteriores e interiores e também o tipo de material das paredes interiores. O inverso obteve-se para detalhes do produto que dizem respeito às portas e às janelas.

Com a utilização do diagrama do método do Esquema do Desenvolvimento do Produto (EDP) foi mais fácil compreender as relações existentes entre os requisitos permitindo chegar mais concretamente a algumas especificações do produto.

Relativamente ao estudo térmico efetuado foi possível concluir que a ferramenta de simulação térmica de edifícios foi essencial e complementar à ferramenta do Desdobramento da Função Qualidade, para que fossem afinados os parâmetros de *design* estipulados na mesma, sem que o conforto térmico no interior fosse comprometido durante todo o processo de desenvolvimento.

No estudo efetuado para os cinco climas foi possível chegar ao nível de conforto adequado para o total de climas estudados.

Concluiu-se também que para o clima continental de verão quente ou Dfb, nomeadamente para Tallinn, capital da Estónia, que para o modelo de casa projetado, conseguem-se atingir as metas para que esta seja inserida na categoria de Casa Passiva.

Para o clima semiárido frio ou BSk ficou-se muito perto desta categoria, não se tendo atingido devido ao constrangimento relativo ao consumo máximo de energia primária, onde se considerou um fator de conversão de energia primária de 2,6, que é um dos valores mais elevados para este fator, podendo este ter sido sobredimensionado.

Este produto, para climas quentes e húmidos, não conseguiu atingir as metas requisitadas de modo a inserir-se na categoria de Casa Passiva.

Com o estudo térmico elaborado e a afinação dos diversos parâmetros, em especial a espessura das paredes, foi possível também chegar às seguintes conclusões, exibidas nas tabelas seguintes.

Tabela 58 – Quadro de resumo com as conclusões finais relativo às áreas e tipologias possíveis para os módulos com painéis de paredes exteriores com $U=0,10 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, de modo a cumprir com os requisitos e constrangimentos.

	T0	T1	T2	T3	T4	T5	T6
Área interior	36	64	72	96	120	120	144
Área interior mínima	22	31	44	54,5	61	74	82,5
Área bruta dos fogos	43	67	82	107	132	132	157
Área bruta mínima dos fogos	35	52	72	91	105	122	134

Tabela 59 – Resumo das conclusões finais relativo às áreas e tipologias possíveis para os módulos com painéis de paredes exteriores com $U=0,45 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, de modo a cumprir com os requisitos e constrangimentos.

	T0	T1	T2	T3	T4	T5	T6
Área interior	36	64	72	96	120	120	144
Área interior mínima	22	31	44	54,5	61	74	82,5
Área bruta dos fogos	38	66	75	99	123	123	148
Área bruta mínima dos fogos	35	52	72	91	105	122	134

Na Tabela 58 e na Tabela 59 encontram-se as conclusões finais relativamente às áreas e tipologias possíveis para os módulos com painéis de paredes exteriores com $U=0,10 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ e $0,45 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, respetivamente, de modo a cumprir com os requisitos e constrangimentos previamente definidos.

Tabela 60 - Resumo das conclusões finais relativo às tipologias habitacionais possíveis para os módulos com painéis de paredes exteriores com $U=0,10 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, para cada tipo de contentor.

Tipo de contentor	Tipologia possível	Área mínima do módulo (m^2)	Área máxima do módulo (m^2)
6096 mm	-	-	-
12192 mm	T ₀ e T ₁	36	64
High Cube de 12192 mm			
High Cube de 13716 mm	T ₀ , T ₁ e T ₂		72

Tabela 61 - Resumo das conclusões finais relativo às tipologias habitacionais possíveis para os módulos com painéis de paredes exteriores com $U=0,45 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, para cada tipo de contentor.

Tipo de contentor	Tipologia possível	Área mínima do módulo (m^2)	Área máxima do módulo (m^2)
6096 mm	T ₀ , T ₁ , T ₂ e T ₃		96
12192 mm	T ₀ , T ₁ , T ₂ , T ₃ , T ₄ , T ₅ e T ₆	36	144
High Cube de 12192 mm			
High Cube de 13716 mm			

Observa-se, na Tabela 60, que para paredes exteriores com um coeficiente de transferência de calor de $0,10 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ e espessura de 280,2 mm, num contentor com comprimento de 6096 mm não é possível transportar qualquer casa com estas especificações. Para os contentores de comprimento 12192 mm, normal, e do mesmo comprimento mas do tipo *High Cube* é possível transportar as tipologias T_0 e T_1 , enquanto que, para o contentor do tipo *High Cube* de 13716 mm é possível transportar as tipologias T_0 , T_1 e T_2 .

Para casas cujo coeficiente de transferência de calor seja mais alto, neste caso, $0,45 \text{ W/(m}^2\text{K)}$, e a espessura das paredes exteriores seja de 77,9 mm, tem-se que, de acordo com a Tabela 61, que para contentores com 6096 mm é possível transportar casas da tipologia T_0 à T_3 . Para os restantes tipos de contentores, é possível transportar casas da tipologia T_0 à T_6 .

Relativamente ao custo base estimado, concluiu-se que para uma casa para o clima Aw que esta possui um preço base mais baixo devido, especialmente, devido à menor quantidade de poliuretano, sendo a espessura cerca de seis vezes menor comparadamente com a espessura do isolamento térmico necessário para as casas dos restantes climas.

Para o clima BSh a casa é mais cara especialmente devido aos vários modelos de mecanismos de sombreamento que acabam por encarecer a solução final.

No entanto, para todos os climas verifica-se que, tendo-se apenas em consideração, os materiais básicos necessários para a construção dos diversos painéis, que conseguiu-se obter cinco produtos diferentes com preços bastante inferiores aos 50.000 euros máximos estipulados no estudo do produto.

Os preços entre as cinco soluções globais existentes variam ligeiramente conforme as diferentes necessidades técnicas, sendo no entanto, a diferença entre a solução mais dispendiosa e a mais barata de cerca de 14.000 euros.

Tem-se então que a proposta final é uma casa de tipologia T_2 completamente modular com dimensões normalizadas, passível de ser transportada por camião, reboque ou contentor marítimo e de ser facilmente montada *onsite*, uma vez que as suas dimensões assim o permitem. A solução proposta contribui também para a redução de desperdícios de material na medida em que foram feitas escolhas

racionais aquando a escolha das dimensões dos materiais comerciais existentes no mercado e reutilizando os materiais que restavam em outros elementos construtivos.

Conclui-se assim, que os objetivos propostos inicialmente foram em grande parte cumpridos, conseguindo-se, através de ferramentas de desenvolvimento do produto e de simulação dinâmica de edifícios, desenvolver cinco produtos modulares diferentes para cinco climas diferentes. Estes, apesar de seguirem os mesmos parâmetros de *design*, possuem características diferentes de produto para produto de acordo com o tipo de clima, o que já seria de esperar.

Para além da diversificação de produtos obtida, conseguiu-se arranjar uma solução final transversal a esta, que respondesse às exigências iniciais e às barreiras e constrangimentos deste tipo de construção, obtendo-se produtos fáceis de transportar e de construir/montar, termicamente confortáveis e constituídos por materiais resistentes. Aspetos como o facto de ser um produto durável, nesta fase do projeto, é importante mas não faz parte dos objetivos desta dissertação aprofundar este aspeto.

7.2. Trabalhos futuros

Sendo o presente trabalho um pré-estudo da casa modular projetada, propõe-se como alvo de estudo de trabalhos futuros, a continuação do mesmo até um maior nível de detalhe, como o desenvolvimento do sistema de ligação dos painéis, etc. Seria também interessante a realização da avaliação do ciclo de vida e respetivo impacte ambiental dos materiais aplicados nas soluções construtivas estudadas como sendo mais uma forma de combater a perceção negativa do mercado em relação a este tipo de construção.

Num outro nível, poderia também ser feito um estudo acerca da influência no desempenho térmico de eventuais outras disposições da casa modular, de modo a determinar qual a disposição mais adequada.

Sendo este trabalho uma abordagem diferente ao tema da construção modular, e uma vez que são utilizadas ferramentas utilizadas pelo engenheiro mecânico relacionadas com o estudo e desenvolvimento de novos produtos, outro trabalho interessante seria fazer um estudo semelhante ao do presente trabalho, no entanto, aplicado ao setor dos serviços. Estes tipos de edifícios têm clientes e necessidades diferentes dos do setor residencial, logo na perspectiva de um engenheiro mecânico são considerados produtos diferentes. Nesse trabalho seria interessante estudar o efeito dos ganhos internos nos parâmetros estudados também para os climas escolhidos no presente trabalho. No fim, poderiam ser feitas comparações com os resultados obtidos nesta dissertação e de certa forma ser feita uma compilação com ambos resultados.

Por último gostaria de propor também o desenvolvimento de um programa em *Visual Basic* ou *Matlab*, mas de preferência a primeira opção, uma vez que é possível criar uma interface didática para o utilizador, seja este, um indivíduo ou uma empresa ligada à construção deste tipo de casas. Neste programa o utilizador escolheria as informações relevantes para o projeto e seria-lhe dado automaticamente a solução final.

Referências

1. Gama, Filipa Cristina Sousa. *Análise do desempenho térmico de casas modulares pré-fabricadas*. Aveiro : Universidade de Aveiro, 2013.
2. Timberlake, Kieran. Make It Right. [Online] 2007. [Citação: 5 de Março de 2012.] http://www.kierantimberlake.com/pl_sustainability/make_it_right_1.html..
3. CIRIA. *Standardisation and Pre-assembly Adding Value to Construction Projects*. London : s.n., 1999. Report 176.
4. Lara Jaillon, C.S. Poon. Automation in Construction. *The evolution of prefabricated residential building systems in Hong Kong: A review of the public and the private sector*. 18, 2009.
5. C.Tesla. *The Industrialization of Building*. New York : Van Nostrand Reinhold, 1972.
6. Gibb, A.G.F. *Off-site Fabrication: Prefabrication, Pre-assembly and Modularization*. Latheronwheel : Whittles Publishing, 1999.
7. Richard, R.-B. Industrialised building systems: reproduction before automation and robotics. *Automation in Construction*. 2005, Vol. 14.
8. Schoenborn, Joseph M. *A Case Study Approach to Identifying the Constraints and the barriers to design innovation for Modular Construction*. Blacksburg, VA : Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, 2012.
9. Safdie Architects. *Habitat'67*. [Online] [Citação: 17 de 04 de 2015.] <http://www.msafdie.com/#/projects/habitat67>.
10. Furniture House - Yamanashi, Japan, 1995. *Shigeru Ban Architects*. [Online] [Citação: 17 de 04 de 2015.] http://www.shigerubanarchitects.com/works/1995_furniture-house-1/index.html.
11. *Fabric Architecture / Fabric Structures*. [Online] Sam Armijos, 15 de 11 de 2010. [Citação: 18 de 04 de 2015.] <https://armijos.wordpress.com/2010/11/15/a-pavilion-in-the-park-make-mine-fabric/>.
12. Case Study House 8: The Eames House. *Eames Official Site*. [Online] Eames Office, LLC, 2015. [Citação: 18 de 04 de 2015.] <http://www.eamesoffice.com/the-work/eames-house-case-study-house-8/>.

13. Greven, H., Baldauf, A. *Introdução à coordenação modular da construção no Brasil: uma abordagem actualizada*. Porto Alegre, Brasil : Habitare, 2007. Vol. 9.
14. Patinha, Sérgio Miguel Pinto de Almeida. *Construção modular - desenvolvimento da ideia: casa numa caixa*. Aveiro : s.n., 2011.
15. Bernstein, Harvey M., John E. Gudgel, and Donna Laquidara-Carr. *Prefabrication and Modularization: Increasing Productivity in the Construction Industry*. s.l. : McGraw-Hill Construction: National Institute of Standards and Technology, 2011.
16. Cobbers, Oliver Jahn, Peter Gossel. *"Prefab Houses"*. s.l. : Taschen, 2011.
17. Stephanie Zucchi and Staff Writer. Top 3 Technologies Changing the Construction Industry Right Now. *Metalcon*. [Online] 10 de Agosto de 2015. [Citação: 05 de Dezembro de 2015.] <https://metalconblog.wordpress.com/2015/08/10/top-3-technologies-changing-the-construction-industry-right-now/>.
18. *Loft Cube*. [Online] 1 de Janeiro de 2014. [Citação: 10 de Março de 2015.] <http://www.loftcube.net/>.
19. Marmol Radziner prefab. [Online] 2005. [Citação: 5 de Março de 2015.] <http://www.marmol-radziner.com/prefab/prefabmain.html>.
20. Centurysteel. [Online] 2012. [Citação: 5 de Março de 2015.] <http://www.centurysteel.pt/painelizacao.html>.
21. Painel Sandwich. *Ferpainel*. [Online] [Citação: 04 de Dezembro de 2015.] <http://ferpainel.com.pt/pt/ms/ms/painel-sandwich-4705-564-priscos/ms-90063398-p-1/>.
22. Sandwich Panels. *Ruukki*. [Online] 2014. [Citação: 04 de Dezembro de 2015.] <http://www.ruukki.com/Construction/Sandwich-panels>.
23. Roof sandwich panel / with aluminum facing / extruded polystyrene core. *Archi Expo*. [Online] 2015. [Citação: 04 de Dezembro de 2015.] <http://www.archiexpo.com/prod/av-composites/product-99204-955442.html>.
24. Centurysteel. [Online] 2012. [Citação: 5 de Março de 2015.] <http://www.centurysteel.pt/painelizacao.html>.
25. Go Green With Structural Insulated Panels. *Big Twig Homes LLC*. [Online] [Citação: 28 de Novembro de 2015.] <http://panelizedhome.net/>.

26. Structural Insulated Panels. *Dimension Canada Networks*. [Online] Dimension Canada Networks, 2010. [Citação: 20 de 04 de 2015.] <http://www.dimensioncanada.ca/SIP.html>.
27. Ramos, A. T. Prefab perfection. *Essential Lisboa*. 20, 2007.
28. Chemiller, P. *Industrializacion de la Construcccion*. Barcelona : Editores tecnicos asociados., 1980.
29. Won-hak Lee, Kyoung-woo Kim, Seock-ho Lim. Improvement of floor impact sound on modular housing for sustainable building. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 29, 2014.
30. Chiang, Tat-Hung, Bo-Sin Tang, and Francis K. W. Wong. "Volume Building as a Competitive Strategy". *Construction Management and Economics*. 2208, Vols. no. 26 (2):161-176.
31. Tam, Vivian W. Y., C. M. Tam, S. X. Zang, and William C. Y. Ng. "Towards Adoption of Prefabrication in Construction." . *Building and Environment*. 2007, Vols. no. 42 (10):3642-3654.
32. Lu, Na. *Investigation of the Designers' and General Contractors' Perceptions of Offsite Construction Techniques in the United States Construction Industry*. Clemson, GA : Department of Career and Technology Education, Clemson University, 2007.
33. Bernstein, Harvey M., John E. Gudgel, and Donna Laquidara-Carr. *Prefabrication and Modularization: Increasing Productivity in the Construction Industry. In SmarkMarket Report*. s.l. : McGraw-Hill Construction: National Institute of Standards and Technology, 2011.
34. Haas, Carl T., James T. O'Connor, Richard L. Tucker, Jason A. Eickmann, and Walter. *Prefabrication and Preassembly Trends and Effects on the Construction Workforce*. Austin, Texas : Center for Construction Industry Studies, 2000.
35. Yeang, K. *Proyectar com la natureza: bases ecológicas para el proyecto arquitectónico*. Barcelona : Barcelona:GC, 1999.
36. Livinghomes. [Online] 2014. [Citação: 6 de Março de 2015.] <http://www.livinghomes.net/primer.html>.
37. Stillwater Dwellings. [Online] 2015. [Citação: 7 de Março de 2015.] <http://stillwaterdwellings.com/>.

38. Mashable. 5 Companies on the Cutting Edge of Sustainable Prefab Housing. [Online] © Mashable, Inc., 2005-2015. [Citação: 07 de Março de 2015.] http://mashable.com/2012/07/25/sustainable-prefab-housing/#_.
39. Asensio_Mah Architecture/Urbanism. [Online] [Citação: 9 de Março de 2015.] <http://www.asensio-mah.com/>.
40. decoist - Architecture & interior design. [Online] 2009-2015. [Citação: 9 de Março de 2015.] <http://www.decoist.com/2012-08-27/8-modular-home-designs-with-modern-flair/>.
41. Goodwin, Andrew. Method Homes to Debut Net-Zero Prefab Paradigm House Next Month in San Fransisco. *inhabitat*. [Online] 15 de Outubro de 2012. [Citação: 9 de Março de 2015.] <http://inhabitat.com/method-homes-to-debut-their-net-zero-prefab-paradigm-house-next-month-in-san-fransisco/>.
42. Carbon Positive House. *ArchiBlox*. [Online] [Citação: 9 de Março de 2015.] <http://www.archiblox.com.au/projects/carbon-positive-house/>.
43. Inércia Térmica. *Futureng*. [Online] 2003-2014. [Citação: 10 de Março de 2015.] <http://www.futureng.pt/inercia-termica>.
44. Feng, Y. Thermal design standards for energy efficiency of residential buildings in hot summer/cold winter zones. *Energy and Buildings*. 36, 2004.
45. Balaras, C.A. The role of thermal mass on the cooling load of buildings: an overview of computational methods. *Energy and Buildings*. 24, 1996.
46. Arquitetura bioclimática. *Wikipedia*. [Online] 2014 de Maio de 2014. [Citação: 13 de Fevereiro de 2015.] http://pt.wikipedia.org/wiki/Arquitetura_bioclim%C3%A1tica.
47. Lago, Celina. Arquitetura Sustentável: Arquitetura Bioclimática. *Arquitetura Sustentável*. [Online] 26 de Janeiro de 2015. [Citação: 13 de Fevereiro de 2015.] <http://www.celinalago.com.br/2015/01/arquitetura-bioclimatica.html>.
48. Construção sustentável - Arquitectura Bioclimática. *Tudo sobre Casas Pré-Fabricadas, Casas Modulares e Casas de Madeira*. [Online] Tudo sobre Casas Pré-Fabricadas, Casas Modulares e Casas de Madeira, 2008-2015. [Citação: 13 de Fevereiro de 2015.] <http://casasprefab.blogspot.pt/2010/11/construcao-sustentavel.html>.
49. Gonçalves, H. e Graça, J. Mariz. Conceitos bioclimáticos param os edifícios em Portugal. *Repositório Científico do LNEG*. DGGE/IP-3E, 1998.

50. *Prefab Architecture: A guide to modular design and construction*. Ryan E. Smith, James Timberlake. Hoboken, New Jersey : John Wiley & Sons, Inc., 2010.

51. Allison Arieff, Bryan Burkhart. *Prefab*. Layton : Gibbs Smith, 2002.

52. Framing (construction). *Wikipédia - The free encyclopedia*. [Online] Wikimedia Foundation, Inc., 7 de Janeiro de 2015. [Citação: 12 de Fevereiro de 2015.] [https://en.wikipedia.org/wiki/Framing_\(construction\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Framing_(construction)).

53. dezeen magazine. "The perfect architectural symbol for an era obsessed with customisation and participation". *dezeen magazine*. [Online] Justin McGuirk, 20 de Março de 2014. [Citação: 12 de Fevereiro de 2015.] <http://www.dezeen.com/2014/03/20/opinion-justin-mcguirk-le-corbusier-symbol-for-era-obsessed-with-customisation/>.

54. Consumers review for the modular world: History of modular homes & buildings. *Modular Today*. [Online] Modular Today, 2003-2015 . [Citação: 12 de Fevereiro de 2015.] <http://www.modulartoday.com/modular-history.html>.

55. Warszawski, A. *Industrialized and Automated Building Systems*. London : E&FN Spon, 1999.

56. Wikipédia. Dymaxion House. *Wikipédia*. [Online] Wikimedia Foundation, Inc., 6 de Setembro de 2014. [Citação: 12 de Março de 2015.] https://en.wikipedia.org/wiki/Dymaxion_house.

57. Burns, Carol. A Manufactured Housing Studio: Home On the Highway. *Journal of Architectural Education*. 2001, Vol. 55.

58. Arieff, Allison. "Prefab Lives!" . *The New York Times*. 2013.

59. Nissen Huts - Original 1940s Nissen huts. *Bentwaters Parks*. [Online] Bentwaters Parks Ltd, Rendlesham, Suffolk, 2015. [Citação: 10 de Março de 2015.] <http://www.bentwatersparks.com/tv-and-film-location/nissen-huts>.

60. Jean Prouvé Architecture - Ferembal Demountable House. *Galerie Patrick Seguin - 20Th Century Furniture & Architecture*. [Online] Galerie Patrick Seguin. [Citação: 12 de Março de 2015.] <http://www.patrickseguin.com/en/designers/architect-jean-prouve/available-houses-jean-prouve/ferembal-house-1948/>.

61. Chamberlain | Prouvé. *Gagosian Gallery*. [Online] Gagosian Gallery, 2015. [Citação: 12 de Março de 2015.] <http://www.gagosian.com/exhibitions/chamberlain-prouv-february-26-2015>.

62. Modern Homes Survey - Carl Koch. *National Trust for Historic Preservation*. [Online] National Trust for Historic Preservation, 2009. [Citação: 12 de Março de 2015.] <http://www.preservationnation.org/travel-and-sites/sites/northeast-region/new-canaan-ct/architects/carl-koch.html>.
63. Koch, Carl. *At Home with Tommorrow*. Toronto, Canada : Clarke, Irwin and, 1958.
64. Hilarion, Stéphane. La Maison tropicale de Jean Prouvé remontée à Nancy pour l'été. *francetvinfo*. [Online] CultureBox, 23 de Maio de 2004. [Citação: 12 de Março de 2015.] <http://culturebox.francetvinfo.fr/tendances/architecture/la-maison-tropicale-de-jean-prouve-remontee-a-nancy-pour-le-ete-156375>.
65. Farnsworth House. *Farnsworth House*. [Online] National Trust for Historic Preservation, 2014. [Citação: 17 de Abril de 2015.] <http://farnsworthhouse.org/>.
66. Techbuilt House. *dwell*. [Online] Dwell Media LLC, 8 de December de 2010. [Citação: 10 de Março de 2015.] <http://www.dwell.com/house-tours/article/techbuilt-house>.
67. *Habitat 67*. [Online] [Citação: 18 de Março de 2015.] <http://www.habitat67.com/home.html>.
68. Bergdoll, Barry and Peter Christensen. *Home Delivery: Fabricating the Modern Dwelling*. New York : The Museum of Modern Art, 2008.
69. jean maneval. *Mercier & Associés - Architecture, Design, Documentation*. [Online] Mercier et associés. [Citação: 17 de Março de 2015.] <http://www.mercieretassocies.com/artiste.php?id=13>.
70. *FuturoHouse.net*. [Online] [Citação: 17 de Março de 2015.] <http://www.futurohouse.net/>.
71. Venturo av Matti Suuronen. *Korthuset*. [Online] Korthuset. [Citação: 17 de Março de 2015.] <http://www.korthuset.com/start/venturo.html>.
72. Venturo. *Wikipedia - The free encyclopedia*. [Online] Wikimedia Foundation, Inc., 2014 de Outubro de 2015. [Citação: 17 de Março de 2015.] <http://en.wikipedia.org/wiki/Venturo>.
73. Nakagin Capsule Tower: A prototype for today's micro housing. *Archdaily*. [Online] ArchDaily , 28 de Outubro de 2008-2015. [Citação: 17 de Março de 2015.] <http://www.archdaily.com/tag/nakagin-capsule-tower/>.

74. AD Classics: Ramot Polin / Zvi Hecker. *Archdaily*. [Online] Gili Merin, 18 de Agosto de 2013. [Citação: 12 de Março de 2015.] <http://www.archdaily.com/416666/ad-classics-ramot-polin-zvi-hecker/>.
75. McCain, Mark. "Modular Housing Gaining Acceptance. *New York Times*. 1989.
76. The Yacht House. *horden cherry lee architects*. [Online] Horden Cherry Lee architects Ltd. [Citação: 17 de Abril de 2015.] <http://www.hcla.co.uk/index.php?id=165>.
77. Marfa weehouse. *Alchemy Architects*. [Online] Alchemy Architects, 13 de Junho de 2013. [Citação: 20 de Abril de 2015.] <http://www.weehouse.com/?portfolio=marfa-weehouse>.
78. *m-ch: micro compact house*. [Online] micro compact home ltd. [Citação: 10 de Março de 2015.] <http://www.microcompacthome.com/>.
79. Frearson, Amy. Micro Compact Home 016 by Richard Horden. *Dezeen Magazine*. [Online] 19 de Junho de 2012. [Citação: 17 de Abril de 2015.] <http://www.dezeen.com/2012/06/19/micro-compact-home-016-by-richard-horden/>.
80. Quik House. *Industrial Zombie*. [Online] Industrial Zombie, LLC, 2015. [Citação: 10 de Março de 2015.] <http://www.inzombie.com/>.
81. Wong, S.L., et al. Changes in bioclimates in different climates around the world and implications for the built environment. *Building and Environment*. 57, 2012.
82. Yun Lin, João. *Como arrefecer o planeta*. s.l. : Editorial Presença, 2008.
83. Deliang Chen, Hans Weiteng Chen. Using the Köppen classification to quantify climate variation and change: An example for 1901–2010. *Environmental Development*. 6, 2013.
84. Peel, M.C.F., B.I e McMahon, and T.A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences*. 11, 2007.
85. Neves, Yadira Coromoto Dias. *Conceção bioclimática de edifícios industriais*. Aveiro : Departamento de Engenharia Mecânica - Universidade de Aveiro, 2013.
86. Total Population (in number of people). *The World Bank*. [Online] The World Bank Group, 2015. [Citação: 2015 de Agosto de 2015.] <http://data.worldbank.org/indicator/SP.POP.TOTL>.

87. Semi-arid climate. *Wikipedia*. [Online] Wikimedia Foundation, Inc., 2 de Outubro de 2015. [Citação: 26 de Outubro de 2015.] https://en.wikipedia.org/wiki/Semi-arid_climate.
88. Average Weather and Climate in Senegal. *World Weather and Climate Information*. [Online] World Weather and Climate Information, 2010-2015. [Citação: 26 de Outubro de 2015.] <https://weather-and-climate.com/average-monthly-Rainfall-Temperature-Sunshine-in-Senegal>.
89. AVERAGE WEATHER IN DAKAR, SENEGAL. *World Weather and Climate Information*. [Online] World Weather and Climate Information, 2010-2015. [Citação: 26 de Outubro de 2015.] <https://weather-and-climate.com/average-monthly-Rainfall-Temperature-Sunshine-in-Dakar-Senegal>.
90. Tropical savanna climate. *Wikipedia*. [Online] Wikimedia Foundation, Inc., 7 de Outubro de 2015. [Citação: 26 de Outubro de 2015.] https://en.wikipedia.org/wiki/Tropical_savanna_climate.
91. Honduras Climate. *MC Tours - Centro America*. [Online] MC Tours - Centroamerica, 2015. [Citação: 26 de Outubro de 2015.] <http://www.mctours-honduras.com/Resources/General-Info/Honduras-Climate.html>.
92. Tegucigalpa Weather and When To Go. *Trip advisor*. [Online] TripAdvisor LLC, 2015. [Citação: 26 de Outubro de 2015.] <http://www.tripadvisor.com/Travel-g292026-s208/Tegucigalpa:Honduras:Weather.And.When.To.Go.html>.
93. Iran. *Weather Online*. [Online] WeatherOnline Ltd, 1999-2015. [Citação: 26 de Outubro de 2015.] <http://www.weatheronline.co.uk/reports/climate/Iran.htm>.
94. Teheran Climate & Temperature. *ClimaTemps.com*. [Online] ClimaTemps.com, 2009-2015. [Citação: 26 de Outubro de 2010.] <http://www.tehran.climatemps.com/>.
95. Tropical monsoon climate. *Wikipedia*. [Online] Wikimedia Foundation, Inc., 23 de Outubro de 2015. [Citação: 26 de Outubro de 2015.] https://en.wikipedia.org/wiki/Tropical_monsoon_climate.
96. Average Weather and Climate in Suriname. *World Weather and Climate Information*. [Online] World Weather and Climate Information, 2010-2015. [Citação: 27 de Outubro de 2015.] <https://weather-and-climate.com/average-monthly-Rainfall-Temperature-Sunshine-in-Suriname>.
97. Weather and Climate - Moist Continental Mid-latitude Climates - D Climate Type. *The Encyclopedia of Earth*. [Online] 13 de Janeiro de 2011. [Citação: 26 de Outubro de 2015.] <http://www.eoearth.org/view/article/162285/>.

98. Humid continental climate. *Wikipedia*. [Online] Wikimedia Foundation, Inc., 17 de Outubro de 2015. [Citação: 26 de Outubro de 2015.] https://en.wikipedia.org/wiki/Humid_continental_climate.
99. Estonia. *Weather Online*. [Online] WeatherOnline Ltd., 1999-2015. [Citação: 26 de Outubro de 2015.] <http://www.weatheronline.co.uk/reports/climate/Estonia.htm>.
100. Tallinn Monthly Climate Average, Estonia. *World Weather Online*. [Online] World Weather Online®, 2015. [Citação: 26 de Outubro de 2015.] <http://www.worldweatheronline.com/Tallinn-weather-averages/Harjumaa/EE.aspx>.
101. Reboque de carga geral. *Mergul*. [Online] [Citação: 30 de Março de 2015.] http://www.mergul.pt/index.php?option=com_content&view=article&id=14&silverheader=0&Itemid=3.
102. Reboque Porta Máquinas 2/3 eixos. *Mergul*. [Online] [Citação: 30 de Março de 2015.] http://www.mergul.pt/index.php?option=com_content&view=article&id=13&silverheader=0&Itemid=3.
103. Semi-reboque carga geral. *Mergul*. [Online] [Citação: 30 de Março de 2015.] http://www.mergul.pt/index.php?option=com_content&view=article&id=15&silverheader=1&Itemid=3.
104. Semi-reboque porta máquinas. *Mergul*. [Online] [Citação: 30 de Março de 2015.] http://www.mergul.pt/index.php?option=com_content&view=article&id=17&silverheader=1&Itemid=3.
105. Comissão, Europeia. Good Practice Guide. *Chapter 3 - Container Specifications*. [Online] 2002. [Citação: 2 de Abril de 2015.] http://ec.europa.eu/taxation_customs/elearning/demo/container/library/GPG/chapter_3_Container_specifications.pdf.
106. Product development. *Business Dictionary*. [Online] WebFinance, Inc, 2015. [Citação: 17 de Março de 2015.] <http://www.businessdictionary.com/definition/product-development.html>.
107. Parmar, Filippo A. Salustri and Jayesh. Product Design Schematics: Structured Diagram for Requirements Engineering. 2004.
108. Innovation Management. *Innovation Process Management*. [Online] 2003. [Citação: 18 de Agosto de 2015.] <http://www.ipm-marketing.co.uk/>.

109. Desdobramento da Função Qualidade (QFD). *InfoEscola - Navegando e Aprendendo*. [Online] 2006. [Citação: 18 de Agosto de 2015.] http://www.infoescola.com/administracao_/desdobramento-da-funcao-qualidade-qfd/.

110. Cálculo da Resistência Térmica de Materiais de Isolamento Térmico Para Edifícios. *Agência Regional da Energia e Ambiente da Região Autónoma da Madeira*. [Online] [Citação: 21 de Agosto de 2015.] <http://www.arem.pt/download/diversos/Resistencia%20termica%20de%20materiais%20isolantes.pdf>.

111. Sustainable Buildings. *International Energy Agency*. [Online] OECD/IEA, 2015. [Citação: 3 de Outubro de 2015.] <http://www.iea.org/topics/energyefficiency/subtopics/sustainablebuildings/>.

112. Magali Bodart, Arnaud Evrard. *Architecture & Sustainable Development (vol. 2): 27th International Conference on Passive and Low Energy Architecture*. Louvain : Presses univ. de Louvain, 2011.

113. ANSI/ASHRAE Standard 140-2004 Building Thermal Envelope and Fabric Load Tests. *DesignBuilder*. [Online] DesignBuilder Software, 17 de Junho de 2006. [Citação: 2 de Outubro de 2015.] <http://www.designbuilder.co.uk>.

114. About Passive House - What is a Passive House? *Passive House Institute*. [Online] Passive House Institute, 2015. [Citação: 15 de Outubro de 2015.] http://www.passiv.de/en/02_informations/01_whatisapassivehouse/01_whatisapassivehouse.htm.

115. The Passive House – sustainable, affordable, comfortable, versatile. *International Passive House Association*. [Online] International Passive House Association. [Citação: 7 de Outubro de 2015.] http://www.passivehouse-international.org/index.php?page_id=79.

116. Actuação/ Eficiência. *Casa Passiva - Passivhaus Zero-Energy - Plataforma Portuguesa*. [Online] Casa Passiva PassivHaus Zero-Energy. [Citação: 04 de Outubro de 2015.] http://www.casapassiva.pt/actuacao_energia_eficiencia.html.

117. Actuação - Energia. *Casa Passiva PassivHaus Zero-Energy - Plataforma Portuguesa*. [Online] Casa Passiva PassivHaus Zero-Energy. [Citação: 02 de Outubro de 2015.] http://www.casapassiva.pt/actuacao_energia_eficiencia.html.

118. Ponte Térmica. *Futur Eng*. [Online] Futureng, 2003-2014. [Citação: 25 de Outubro de 2015.] <http://www.futureng.pt/pontes-termicas>.

119. Passive House - Requisitos. *Associação Passivhaus Portugal - PHPT*. [Online] Passivhaus.pt, 2013. [Citação: 02 de Outubro de 2015.] <http://www.passivhaus.pt/requisitos.html>.
120. Portugal, Associação Passivhaus de. A Passive House como solução para os edifícios como solução para os edifícios com necessidades quase nulas de energia (NZEB). *Passivhaus Portugal*. [Online] 26 de Junho de 2015. [Citação: 02 de Outubro de 2015.] <http://www.passivhaus.pt/images/comunicacao/20150626-comunicado-Associacao-Passivhaus-Portugal.pdf>.
121. Kurnitski, Jarek. *Cost Optimal and Nearly Zero-Energy Buildings (nZEB) - Definitions, Calculation Principles and Case Studies*. Londres : Springer, 2013.
122. E. Molenbroek, E. Stricker, T. Boermans. *Primary energy factors for electricity in buildings*. Utrecht : s.n., 2011.
123. Comfort Analysis. *DesignBuilder Software - Help*. [Online] DesignBuilder. [Citação: 14 de Agosto de 2015.] http://www.designbuilder.co.uk/helpv3/Content/Comfort_Analysis.htm.
124. Condicionamento de ar. *Wikipédia*. [Online] 11 de Outubro de 2015. [Citação: 05 de Dezembro de 2015.] https://pt.wikipedia.org/wiki/Condicionamento_de_ar.
125. Roriz, L. Equipamentos Primários. [Online] (2008-2009). [Citação: 07 de Novembro de 2015.] http://web.ist.utl.pt/luis.roriz/MyPage/Equips_08.pdf.
126. Qual é o princípio de funcionamento de um Ar Condicionado? *ADias - Ar condicionado*. [Online] [Citação: 06 de 11 de 2015.] http://www.adias.com.br/funcionamento_do_ar.
127. Bombas de Calor Ar-ar Daikin. *Daikin*. [Online] Daikin. [Citação: 07 de Novembro de 2015.] <http://www.daikin.pt/for-your-home/needs/air-conditioning/>.
128. Passive House Guidelines. *International Passive House Association*. [Online] International Passive House Association. [Citação: 20 de Outubro de 2015.] http://www.passivehouse-international.org/index.php?page_id=80&level1_id=78.
129. Legislação - Licenciamento. *Tudo sobre casas pré-fabricadas, casas modulares e casas de madeira*. [Online] 2008-2015. [Citação: 21 de Agosto de 2015.] <http://casasprefab.blogspot.pt/2011/01/legislacao-licenciamento.html>.
130. A Brief Explanation of Compaction Grouting. *Do It Yourself*. [Online] DoItYourself.com Inc., 1995-2015. [Citação: 28 de Outubro de 2015.] <http://www.doityourself.com/stry/what-is-compaction-grouting>.

131. Torgal, F. P., Jalali, S. *A Sustentabilidade dos Materiais de Construção*. s.l. : TecMinho, 2010.
132. Shed Wood Foundation. *Best Home Ideas for Free*. [Online] 2015. [Citação: 28 de Outubro de 2015.] <http://homeideasfree.info/shed-wood-foundation/>.
133. Porta de Entrada Sevilha Branca 98 cm. *Leroy Merlin*. [Online] © Leroy Merlin - Bricolage, Construção, Decoração e Jardim, 2015. [Citação: 15 de Novembro de 2015.] <http://www.leroymerlin.pt/Site/Produtos/Madeiras/Portas/Portas-de-entrada/16777201.aspx>.
134. *Portas de Interior*. [Online] Hörmann Portugal, Lda, 02 de 2010. [Citação: 15 de Novembro de 2015.] <http://www.acachada.pt/pdf/portas-interior.pdf>.
135. Isolamentos térmicos / Acústicos - Lã de Rocha. *Fibrosom - Materiais de Construção* S.A. [Online] Fibrosom. [Citação: 29 de Setembro de 2015.] <http://www.fibrosom.com/ficheiros/pdfs/laderocha.pdf>.
136. Freitas, Filipe Miguel Costa. *Construção Modular Sustentável - Propostas de um projeto tipo*. s.l. : Instituto Politécnico de Viana do Castelo, 2014.
137. Kit Casa - "Termopan Modelos". *TermoPan Steel*. [Online] 2011. [Citação: 04 de Dezembro de 2015.] <http://www.termopan-steel.com/>.
138. Gerador de Preços. *CYPE - Software de Engenharia e Construção*. [Online] CYPE. [Citação: 16 de Outubro de 2015.] <http://geradordeprecos.cype.pt/>.

Anexos

Anexo I – Tabelas auxiliares na definição de critérios e de constrangimentos

a) O Clima

Lista de países com os climas escolhidos para a simulação da casa modular no *DesignBuilder* e PIB respetivo referente a 2014. Dados do “*The World Bank*”.

	PIB <i>per capita</i> 2014 (Dólares Americanos)	PIB <i>per capita</i> 2014 (Euros)	Média PIB <i>per capita</i> 2014 por clima
Clima BSh			
Botswana	7.757,0	6.959,4	2.855,4
Senegal	1.070,9	960,8	
Burkina Faso	720,0	646,0	
Clima Aw			
Tailândia	5.560,7	4.989,0	2.428,5
Cuba	6.848,2*2013	6.144,1	
Gana	1.461,4	1.311,3	
Costa do Marfim	1.646,4	1.477,1	
Paraguai	4.479,1	4.018,6	
El Salvador	3.950,7	3.544,5	
Honduras	2.346,7	2.105,4	
Gabão	10.067,5	9.032,4	
Benim	825,2	740,4	
Haiti	832,9	747,3	
Guiné	550,0	493,5	
Togo	646,1	579,7	
Republica Centro Africana	378,6	339,7	
Guiné-Bissau	585,6	525,4	
Gambia	422,8	379,3	
Clima BSk			
Irão	5.292,9	4.748,7	5.187,9
Azerbaijão	7.884,2	7.073,6	
Mongólia	4.170,2	3.741,4	
Clima Am			
Guiné Equatorial	18.389,4	16.498,7	6.608,76
Suriname	9.825,7*(2013)	8.815,4	
Serra Leoa	788,4	707,3	
Libéria	461.0	413,6	
Clima Dfb			
Polónia	14.422,8	12.939,9	18.214,0

Áustria	51.127,1	45.870,4	
Dinamarca	60.634,4	54.400,1	
Republica Checa	19.553,9	17.543,3	
Hungria	13.902,7	12.473,3	
Ucrânia	3.082,5	2.765,6	
Eslováquia	18.416,5	16.523,0	
Bielorrússia	8.082,5	7.213,4	
Lituânia	16.444,8	14.754,0	
Letônia	16.037,8	14.388,8	
Estônia	19.719,8	17.692,3	
Moldávia	2.233,8	2.004,1	

b) Tipologias possíveis para a casa de referência

	Tipologia T ₀			
	6096 mm	12192 mm	High Cube de 12192 mm	High Cube de 13716 mm
Nº de painéis das paredes exteriores transportados no total			12	
Volume total dos painéis das paredes exteriores (m ³)			4,6	
Comprimento útil (m)			6	
Largura útil (m)			6	
Área útil (m ²)			36	
Área bruta (m ²)			38	
Área total dos painéis da cobertura (m ²)			44	
Volume total dos painéis da cobertura (m ³)			0,6	
			2,8	
			3,2	
Nº de painéis da cobertura transportados no total			9	
Volume total dos painéis do pavimento (m ³)			0,4	
			1,8	
			2,1	
Nº de painéis do pavimento transportados no total			9	
Volume total dos painéis das paredes interiores (m ³)			1,0	
Nº de painéis das paredes interiores transportados no total			5	
Nº total de painéis transportados			35	
Volume total ocupado (m ³)			16,5	
Percentagem de volume total ocupado para cada tipo de contentor (%)	50%	24%	22%	19%

Tipologia T ₁				
	6096 mm	12192 mm	High Cube de 12192 mm	High Cube de 13716 mm
Nº de painéis das paredes exteriores transportados no total			14	
Volume total dos painéis das paredes exteriores (m ³)			5,4	
Comprimento útil (m)			8	
Largura útil (m)			8	
Área útil (m ²)			64	
Área bruta (m ²)			67	
Área total dos painéis da cobertura (m ²)			57	
Volume total dos painéis da cobertura (m ³)			1,2	
			4,1	
			3,2	
Nº de painéis da cobertura transportados no total			12	
Volume total dos painéis do pavimento (m ³)			0,8	
			2,8	
			2,1	
Nº de painéis do pavimento transportados no total			12	
Volume total dos painéis das paredes interiores (m ³)			1,7	
Nº de painéis das paredes interiores transportados no total			9	
Nº total de painéis transportados			47	
Volume total ocupado (m ³)			21,3	
Percentagem de volume total ocupado para cada tipo de contentor (%)	65%	31%	28%	24%

Tipologia T ₂				
	6096 mm	12192 mm	High Cube de 12192 mm	High Cube de 13716 mm
Nº de painéis das paredes exteriores transportados no total			18	
Volume total dos painéis das paredes exteriores (m ³)			6,9	
Comprimento útil (m)			6	
Largura útil (m)			12	
Área útil (m ²)			72	
Área bruta (m ²)			75	
Área total dos painéis da cobertura (m ²)			83,2	
Volume total dos painéis da cobertura (m ³)			2,4	
			6,9	
			3,2	
Nº de painéis da cobertura transportados no total			18	

Volume total dos painéis do pavimento (m³)	1,6	4,6	2,1
Nº de painéis do pavimento transportados no total	18		
Volume total dos painéis das paredes interiores (m³)	2,9		
Nº de painéis das paredes interiores transportados no total	15		
Nº total de painéis transportados	69		
Volume total ocupado (m³)	30,6		
Percentagem de volume total ocupado para cada tipo de contentor (%)	93%	45%	40%
		35%	

Tipologia T ₃				
	6096 mm	12192 mm	High Cube de 12192 mm	High Cube de 13716 mm
Nº de painéis das paredes exteriores transportados no total			20	
Volume total dos painéis das paredes exteriores (m³)			7,7	
Comprimento útil (m)			8	
Largura útil (m)			12	
Área útil (m²)			96	
Área bruta (m²)			99	
Área total dos painéis da cobertura (m²)			108,4	
Volume total dos painéis da cobertura (m³)			4,8	
			8,3	
			3,2	
Nº de painéis da cobertura transportados no total			24	
Volume total dos painéis do pavimento (m³)			3,2	
			5,5	
			2,1	
Nº de painéis do pavimento transportados no total			24	
Volume total dos painéis das paredes interiores (m³)			4,6	
Nº de painéis das paredes interiores transportados no total			24	
Nº total de painéis transportados			92	
Volume total ocupado (m³)			39,4	
Percentagem de volume total ocupado para cada tipo de contentor (%)	119%	58%	52%	45%

Tipologia T ₄				
	6096 mm	12192 mm	High Cube de 12192 mm	High Cube de 13716 mm
Nº de painéis das paredes exteriores transportados no total			22	
Volume total dos painéis das paredes exteriores (m ³)			8,4	
Comprimento útil (m)			10	
Largura útil (m)			12	
Área útil (m ²)			120	
Área bruta (m ²)			124	
Área total dos painéis da cobertura (m ²)			133,6	
Volume total dos painéis da cobertura (m ³)			7,2	
			9,7	
			3,2	
Nº de painéis da cobertura transportados no total			30	
Volume total dos painéis do pavimento (m ³)			4,8	
			6,4	
			2,1	
Nº de painéis do pavimento transportados no total			30	
Volume total dos painéis das paredes interiores (m ³)			6,0	
Nº de painéis das paredes interiores transportados no total			31	
Nº total de painéis transportados			113	
Volume total ocupado (m ³)			47,8	
Percentagem de volume total ocupado para cada tipo de contentor (%)	145%	71%	63%	54%

Tipologia T ₅				
	6096 mm	12192 mm	High Cube de 12192 mm	High Cube de 13716 mm
Nº de painéis das paredes exteriores transportados no total			22	
Volume total dos painéis das paredes exteriores (m ³)			8,4	
Comprimento útil (m)			10	
Largura útil (m)			12	
Área útil (m ²)			120	
Área bruta (m ²)			124	
Área total dos painéis da cobertura (m ²)			133,6	
Volume total dos painéis da cobertura (m ³)			7,2	
			9,7	
			3,2	
Nº de painéis da cobertura transportados no total			30	

Volume total dos painéis do pavimento (m³)			4,8	
			6,4	
			2,1	
Nº de painéis do pavimento transportados no total			30	
Volume total dos painéis das paredes interiores (m³)			1,0	
Nº de painéis das paredes interiores transportados no total			5	
Nº total de painéis transportados			87	
Volume total ocupado (m³)			42,8	
Percentagem de volume total ocupado para cada tipo de contentor (%)	130%	63%	56%	48%

Tipologia T ₆				
	6096 mm	12192 mm	High Cube de 12192 mm	High Cube de 13716 mm
Nº de painéis das paredes exteriores transportados no total			24	
Volume total dos painéis das paredes exteriores (m³)			9,2	
Comprimento útil (m)			12	
Largura útil (m)			12	
Área útil (m²)			144	
Área bruta (m²)			148	
Área total dos painéis da cobertura (m²)			158,8	
			9,6	
Volume total dos painéis da cobertura (m³)			11,0	
			3,2	
Nº de painéis da cobertura transportados no total			36	
			6,4	
Volume total dos painéis do pavimento (m³)			7,4	
			2,1	
Nº de painéis do pavimento transportados no total			36	
Volume total dos painéis das paredes interiores (m³)			6,7	
Nº de painéis das paredes interiores transportados no total			35	
Nº total de painéis transportados			131	
Volume total ocupado (m³)			55,6	
Percentagem de volume total ocupado para cada tipo de contentor (%)	169%	82%	73%	63%

Anexo II – Cálculos auxiliares do projeto térmico

a) Cálculo das cargas internas

No cálculo das cargas térmicas interiores, utilizadas na secção da “Atividade” (*Activity*) em “Outros Ganhos” (*Other Gains*) do *DesignBuilder*, teve-se em conta a potência dos aparelhos elétricos normalmente associados às diferentes divisões da casa.

Tendo em conta a potência do aparelho, estipulou-se o número de horas de funcionamento por dia, o número de dias da semana em que são utilizados ao longo do ano, considerado que um ano tem 364 dias (52 semanas).

Para além dos aspetos mencionados foi também tido em consideração o facto de muitos destes aparelhos não funcionarem todos ao mesmo tempo. Para tal recorreu-se a um fator chamado fator de simultaneidade para evitar o sobredimensionamento do consumo elétrico pelos aparelhos. Este é tirado duma tabela própria:

Potência (kW)	Fator de Simultaneidade
0 a 1	0,88
1 a 2	0,75
2 a 3	0,66
3 a 4	0,59
4 a 5	0,52
5 a 6	0,45
6 a 7	0,40
7 a 8	0,35
8 a 9	0,31
9 a 10	0,27
mais de 10	0,24

Nos quartos a potência total é de 1000 W, ou seja, 1 kW, então aplicou-se o fator de simultaneidade de 0,88 à potência total consumida diariamente. Na sala e cozinha a potência total é superior a 10 kW, logo o fator aplicado foi de 0,24. Para a WC considerou-se apenas a utilização do secador de cabelo com cerca de 1000 W de potência, não se tendo aplicado nenhum fator de simultaneidade a esta divisão.

		Potência (W)	Horas por dia	Dias	Semanas	Consumo energético anual (kWh/ano)	Potência consumida diariamente (W)	Potência total consumida diariamente (W)	Fator de simultaneidade	Potência total consumida diariamente (W)
Quartos	Televisão	-	1	7	52	40	5	67	0,88	59
	Computador	250	6	7	52	546	63			
	Total:	250								
Sala e Cozinha	Frigorífico combinado	-	24	7	52	231	26	608	0,24	146
	Micro-ondas	900	0,42	7	52	138	16			
	Televisão	-	5	7	52	40	5			
	Máquina de lavar roupa	-	0,5	2	52	152	61			
	Forno elétrico	4500	1	2	52	90	36			
	Placa elétrica	7700	1,5	7	52	4204	481			
	Esquentador	-	2	7	52	483				
	Sistema de exaustão	150	1,5	7	52	82	9			
	Total:	13250								
WC	Secador de cabelo	1000	0,42	7	52	153	18	18	-	18

No fim, utilizou-se estes valores de potência diária consumida nos ganhos internos por metro quadrado de área, que foram mais tarde introduzidos no *DesignBuilder* na secção da “Atividade”, como mencionado anteriormente.

Importa também referir que o tipo de lâmpada considerada foi LED com cerca de 1200 lm, tendo sido este o valor utilizado nos cálculos da iluminância (lux), também introduzidos no programa.

	Área (m²)	Ocupação (nº de pessoas)	Densidade ocupacional (pessoas/m²)	Densidade de ganhos internos sempre ligados (W)	Ganhos Internos sempre ligados (W/m²)	Ganhos internos instalados (W)	Densidade de ganhos internos instalados (W/m²)	Nº de lâmpadas	Fluxo luminoso (lúmen)	Iluminância real (lux)	Iluminância ideal (lux)	Iluminação geral (W)
Quarto 1	12	2	0,17	0	0,0	59	5	2	2400	200	150	36
Quarto 2	12	2	0,17	0	0,0	59	5	2	2400	200	150	36
Sala e Cozinha	42	4	0,10	26	1	146	3	11	13200	314	300	198
WC	6	1	0,17	0	0,0	18	3	2	2400	400	450	36

b) Cálculo das necessidades de Água Quente Sanitária – AQS

No cálculo da água quente sanitária, para todos os climas estudados teve-se em consideração os seguintes aspetos:

- Bomba de calor;
- COP de 4,2;
- Eletricidade da rede;
- Temperatura de entrega de 60,0°C;
- Temperatura da rede de 15,0 °C;
- 25 Litros para utilização diária;
- Horário do WC (durante a semana das 18h às 19h e das 22h às 23h e aos fins-de-semana das 19h às 20h e das 23h às 24h).

$$\begin{aligned}Q &= m \times c_p \times \Delta T \\ \Leftrightarrow Q &= 25 \times 4,18 \times (60 - 15) \\ \Leftrightarrow Q &= 4702,5 \text{ J}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Energia térmica}_{\text{anual}} &= \frac{Q \times 4 \times 365}{3600} \\ \Leftrightarrow \text{Energia térmica}_{\text{anual}} &= 1907,1 \text{ kWh}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Energia elétrica}_{\text{anual}} &= \frac{\text{Energia térmica}_{\text{anual}}}{4,2} \\ \Leftrightarrow \text{Energia elétrica}_{\text{anual}} &= 454,1 \text{ kWh}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Consumo energético anual} &= \frac{\text{Energia elétrica}_{\text{anual}}}{\text{Área}} \\ \Leftrightarrow \text{Consumo energético anual} &= \frac{454,1}{72} \\ \Leftrightarrow \text{Consumo energético anual} &= 6,3 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2} = 6306,6 \frac{\text{Wh}}{\text{m}^2}\end{aligned}$$

Anexo III – Tabelas dos resultados do estudo térmico

A ter em atenção que os valores da energia total consumida incluem, para além das necessidades de aquecimento e de arrefecimento, as necessidades de água quente sanitária (AQS) que é de 6,32 kWh/(m²ano), a eletricidade doméstica que é de 17,27 kWh/(m²ano) e a iluminação que no caso de referência, no estudo paramétrico e na proposta base é de 12,94 kWh/(m²ano) mas que após a otimização passa a 9,51 kWh/(m²ano).

Clima BSh – Senegal/ Dakar

	Necessidade de aquecimento (kWh/(m ² ano))	Necessidade de arrefecimento (kWh/(m ² ano))	Energia total consumida (kWh/(m ² ano))	Energia primária total consumida (kWh/(m ² ano))	Desconforto anual (horas)
Referência	0,04	48,53	85,09	221,24	248,64
U_{baixo}	0,00	48,61	85,13	221,34	35,81
U_{alto}	0,14	49,94	86,60	225,17	436,53
%V_{baixa}	0,04	44,33	80,90	210,33	238,74
%V_{alta}	0,08	71,84	108,44	281,95	271,11
I_{baixa}	0,05	48,81	85,39	222,00	282,35
I_{alta}	0,01	48,86	85,39	222,02	99,58
R_{baixa}	0,02	54,67	91,22	237,16	177,72
R_{alta}	0,03	46,43	82,98	215,75	214,65
Proposta base	0,00	42,69	79,21	205,94	34,15
Otimização	0,00	33,45	66,54	173,01	27,40

Clima Aw – Honduras/ Tegucigalpa

	Necessidade de aquecimento (kWh/(m ² ano))	Necessidade de arrefecimento (kWh/(m ² ano))	Energia total consumida (kWh/(m ² ano))	Energia primária total consumida (kWh/(m ² ano))	Desconforto anual (horas)
Referência	0,01	72,09	108,62	282,42	46,79
U_{baixo}	0,00	67,31	103,84	269,98	141,11
U_{alto}	0,03	75,36	111,91	290,98	79,40
%V_{baixa}	0,01	64,55	101,08	262,81	61,06
%V_{alta}	0,00	103,89	140,41	365,07	28,50
I_{baixa}	0,01	72,08	108,61	282,40	55,79
I_{alta}	0,00	71,59	108,12	281,11	217,81
R_{baixa}	0,01	79,93	116,47	302,81	22,22
R_{alta}	0,01	69,21	105,74	274,94	47,21
Proposta base 1	0,00	57,11	93,63	243,43	730,10
Proposta base 2	0,02	62,83	99,37	258,36	80,90
Otimização	0,00	59,53	92,63	240,83	124,43

Clima BSk – Irão/ Teerão

	Necessidade de aquecimento (kWh/(m²ano))	Necessidade de arrefecimento (kWh/(m²ano))	Energia total consumida (kWh/(m²ano))	Energia primária total consumida (kWh/(m²ano))	Desconforto anual (horas)
Referência	5,60	23,92	66,04	171,71	10,81
U_{baixo}	2,62	21,91	61,05	158,74	6,44
U_{alto}	7,82	25,79	70,13	182,35	14,18
%V_{baixa}	5,92	20,68	63,12	164,12	11,56
%V_{alta}	5,37	42,39	84,28	219,14	13,83
I_{baixa}	5,68	23,88	66,08	171,82	11,39
I_{alta}	4,83	23,47	64,82	168,54	6,06
R_{baixa}	4,59	28,78	69,89	181,72	8,97
R_{alta}	5,47	22,06	64,05	166,54	10,40
Proposta base	2,28	17,08	55,88	145,30	4,40
Otimização	2,88	12,70	48,68	126,56	6,40

Clima Am – Suriname/ Zanderij

	Necessidade de aquecimento (kWh/(m²ano))	Necessidade de arrefecimento (kWh/(m²ano))	Energia total consumida (kWh/(m²ano))	Energia primária total consumida (kWh/(m²ano))	Desconforto anual (horas)
Referência	0,00	73,18	109,70	285,22	25,81
U_{baixo}	0,00	68,52	105,04	273,10	40,92
U_{alto}	0,00	76,12	112,64	292,86	39,10
%V_{baixa}	0,00	65,73	102,26	265,88	33,86
%V_{alta}	0,00	105,26	141,78	368,63	20,51
I_{baixa}	0,00	73,16	109,68	285,17	22,13
I_{alta}	0,00	73,34	109,86	285,64	37,63
R_{baixa}	0,00	79,43	115,95	301,47	9,94
R_{alta}	0,00	70,81	107,33	279,06	37,99
Proposta base	0,00	58,75	95,28	247,73	82,40
Otimização	0,00	52,00	85,10	221,26	105,63

Clima Dfb – Estónia/ Tallinn

	Necessidade de aquecimento (kWh/(m²ano))	Necessidade de arrefecimento (kWh/(m²ano))	Energia total consumida (kWh/(m²ano))	Energia primária total consumida (kWh/(m²ano))	Desconforto anual (horas)
Referência	26,75	1,51	64,78	129,56	90,39
U_{baixo}	17,22	1,38	55,12	110,24	84,01
U_{alto}	32,81	1,63	70,97	141,93	90,36
%V_{baixa}	26,08	1,00	63,61	127,22	90,82
%V_{alta}	29,32	5,45	71,30	142,59	80,86
I_{baixa}	26,72	1,54	64,78	129,57	89,33
I_{alta}	26,28	1,25	64,06	128,12	86,47
R_{baixa}	25,32	1,94	63,79	127,57	87,78
R_{alta}	26,31	1,30	64,14	128,28	91,33
Proposta base	15,36	0,94	52,83	105,65	73,68
Otimização	13,67	0,83	47,60	95,20	71,29

Anexo IV – Tabelas de discriminação dos custos

Clima BSh – Senegal/ Dakar

Qtd.	Descrição		Área unitária (m²)			Área total (m²)	Preço (€)
18,0	Painéis paredes exteriores	Pinho					2.348,4
		Superfície de metal					748,1
		Placa de poliuretano	4,8			86,4	2.129,5
		Superfície de metal					748,1
		Pladur					372,4
15,0	Painéis paredes interiores	Pladur					155,2
		Água a 10°C	2,4			36,0	-
		Pladur					155,2
18,0	Painéis da cobertura	Pinho					2.261,4
		Superfície de metal					737,9
		Placa de poliuretano	4,0	4,6	5,3	83,2	2.724,1
		Superfície de metal					737,9
		Painel de fibra de madeira					1034,88
		Pinho					2.261,4
		Pinho					2.261,4
18,0	Painéis do pavimento	Superfície de metal	4,0	4,6	5,3	83,2	737,9
		Placa de poliuretano					2.033,3
		Superfície de metal					737,9
		Pavimento de madeira					1.394,3
6,0	Janelas	Caixilharia e vidro triplo com argon	2,2			13,0	6.331,9
6,0	Sombreamento da janela	Estores venezianos exteriores	2,2			13,0	280,6
6,0	Sombreamento local	Grelha de sombreamento (1,0m)	2,2			13,0	1.350,8
		Pala horizontal (1,0m)	1,8			10,8	1.123,2
		Pala vertical (1,0m)	1,2			7,2	748,8
1,0	Porta exterior (895x2025 mm)		1,8			199,0	199,0
3,0	Portas interiores (800x2000 mm)		1,6			32,0	96,0
						Total:	33.414,4

Clima Aw – Honduras/ Tegucigalpa

Qtd.	Descrição		Área unitária (m²)			Área total (m²)	Preço (€)		
18,0	Painéis paredes exteriores	Pinho	4,8			86,4	2.348,4		
		Superfície de metal					748,1		
		Placa de poliuretano					414,9		
		Superfície de metal					748,1		
		Pladur					372,4		
15,0	Painéis paredes interiores	Pladur	2,4			36,0	155,2		
		Fibra mineral/ lâ					223,2		
		Pladur					155,2		
18,0	Painéis da cobertura	Pinho	4,0			4,6	5,3	83,2	2.261,4
		Superfície de metal							737,9
		Placa de poliuretano							392,8
		Superfície de metal							737,9
		Painel de fibra de madeira							1034,88
		Pinho							2.261,4
18,0	Painéis do pavimento	Pinho	4,0			4,6	5,3	83,2	2.261,4
		Superfície de metal							737,9
		Placa de poliuretano							381,3
		Superfície de metal							737,9
		Pavimento de madeira							1.394,3
		Caixilharia e vidro duplo com argon							2,2
6,0	Janelas	Caixilharia e vidro duplo com argon	2,2	13,0	1.320,6				
6,0	Sombreamento da janela	Estores venezianos exteriores	2,2	13,0	280,6				
6,0	Sombreamento local	Pala horizontal (1,0m)	1,8	10,8	1.123,2				
1,0	Porta exterior (895x2025 mm)		1,8	199,0	199,0				
3,0	Portas interiores (800x2000 mm)		1,6	32,0	96,0				
Total:						20.828,7			

Clima BSk – Irão/ Teerão

Qtd.	Descrição		Área unitária (m²)			Área total (m²)	Preço (€)
18,0	Painéis paredes exteriores	Pinho					2.348,4
		Superfície de metal					748,1
		Placa de poliuretano	4,8			86,4	2.129,5
		Superfície de metal					748,1
		Pladur					372,4
15,0	Painéis paredes interiores	Pladur					155,2
		Água a 10°C	2,4			36,0	-
		Pladur					155,2
18,0	Painéis da cobertura	Pinho					2.261,4
		Superfície de metal					737,9
		Placa de poliuretano	4,0	4,6	5,3	83,2	2.724,1
		Superfície de metal					737,9
		Painel de fibra de madeira					1034,88
		Pinho					2.261,4
		Pinho					2.261,4
18,0	Painéis do pavimento	Superfície de metal					737,9
		Placa de poliuretano	4,0	4,6	5,3	83,2	2.033,3
		Superfície de metal					737,9
		Pavimento de madeira					1.394,3
		6,0	Janelas	Caixilharia e vidro triplo com cripton	2,2		
6,0	Sombreamento da janela	Estores venezianos exteriores	2,2			13,0	280,6
6,0	Sombreamento local	Pala horizontal (1,0m)	1,8			10,8	1.123,2
		Pala vertical (1,0m)	1,2			7,2	748,8
1,0	Porta exterior (895x2025 mm)		1,8			199,0	199,0
3,0	Portas interiores (800x2000 mm)		1,6			32,0	96,0
Total:							34.433,6

Clima Am – Suriname/ Zanderij

Qtd.	Descrição		Área unitária (m²)			Área total (m²)	Preço (€)
18,0	Painéis paredes exteriores	Pinho	4,8			86,4	2.348,4
		Superfície de metal					748,1
		Placa de poliuretano					2.129,5
		Superfície de metal					748,1
		Pladur					372,4
15,0	Painéis paredes interiores	Pladur	2,4			36,0	155,2
		Fibra mineral/ lâ					223,2
		Pladur					155,2
18,0	Painéis da cobertura	Pinho	4,0	4,6	5,3	83,2	2.261,4
		Superfície de metal					737,9
		Placa de poliuretano					2.724,1
		Superfície de metal					737,9
		Painel de fibra de madeira					1034,88
		Pinho					2.261,4
18,0	Painéis do pavimento	Pinho	4,0	4,6	5,3	83,2	2.261,4
		Superfície de metal					737,9
		Placa de poliuretano					2.033,3
		Superfície de metal					737,9
		Pavimento de madeira					1.394,3
6,0	Janelas	Caixilharia e vidro duplo com árgon	2,2			13,0	1.320,6
6,0	Sombreamento da janela	Estores venezianos exteriores	2,2			13,0	280,6
6,0	Sombreamento local	Pala horizontal (1,0m)	1,8			10,8	1.123,2
		Pala vertical (1,0m)	1,2			7,2	748,8
1,0	Porta exterior (895x2025 mm)		1,8			199,0	199,0
3,0	Portas interiores (800x2000 mm)		1,6			32,0	96,0
Total:							27.275,4

Clima Dfb – Estónia/ Tallinn

Qtd.	Descrição		Área unitária (m²)			Área total (m²)	Preço (€)		
18,0	Painéis paredes exteriores	Pinho	4,8			86,4	2.348,4		
		Superfície de metal					748,1		
		Placa de poliuretano					2.129,5		
		Superfície de metal					748,1		
		Pladur				372,4			
15,0	Painéis paredes interiores	Pladur	2,4			36,0	155,2		
		Água a 10°C					-		
		Pladur					155,2		
							Pinho		
18,0	Painéis da cobertura	Superfície de metal	4,0			4,6	5,3	83,2	737,9
		Placa de poliuretano							2.724,1
		Superfície de metal							737,9
		Painel de fibra de madeira							1.034,88
		Pinho							2.261,4
		Pinho							2.261,4
18,0	Painéis do pavimento	Superfície de metal	4,0			4,6	5,3	83,2	737,9
		Placa de poliuretano							2.033,3
		Superfície de metal							737,9
		Pavimento de madeira							1.394,3
6,0	Janelas	Caixilharia e vidro duplo com argon	2,2			13,0	6.331,9		
6,0	Sombreamento da janela	Cortinas escuras	2,2			13,0	-		
6,0	Sombreamento local	Pala horizontal (0,5m)	1,8			10,8	561,6		
1,0	Porta exterior (895x2025 mm)		1,8			199,0	199,0		
3,0	Portas interiores (800x2000 mm)		1,6			32,0	96,0		
Total:							25.461,3		

Anexo V – Tabelas tipologias finais possíveis

a) Paredes exteriores com $U=0,10 \text{ W/m}^2\text{K}$

Tipologia T ₀				
	6096 mm	12192 mm	High Cube de 12192 mm	High Cube de 13716 mm
Nº de painéis das paredes exteriores transportados no total			12	
Volume total dos painéis das paredes exteriores (m ³)			16,1	
Comprimento útil (m)			6	
Largura útil (m)			6	
Área útil (m ²)			36	
Área bruta (m ²)			43	
Área total dos painéis da cobertura (m ²)			43,6	
Volume total dos painéis da cobertura (m ³)			1,5	
			7,0	
			8,1	
Nº de painéis da cobertura transportados no total			9	
Volume total dos painéis do pavimento (m ³)			1,132	
			5,2	
			6,0	
Nº de painéis do pavimento transportados no total			9	
Volume total dos painéis das paredes interiores (m ³)			0,8	
Nº de painéis das paredes interiores transportados no total			5	
Nº total de painéis transportados			35	
Volume total ocupado (m ³)			46,0	
Percentagem de volume total ocupado para cada tipo de contentor (%)	139%	68%	60%	52%

Tipologia T ₁				
	6096 mm	12192 mm	High Cube de 12192 mm	High Cube de 13716 mm
Nº de painéis das paredes exteriores transportados no total			14	
Volume total dos painéis das paredes exteriores (m ³)			18,8	
Comprimento útil (m)			8	
Largura útil (m)			8	
Área útil (m ²)			64	
Área bruta (m ²)			73	

Área total dos painéis da cobertura (m ²)	56,8			
	3,1			
Volume total dos painéis da cobertura (m ³)	10,6			
	8,1			
Nº de painéis da cobertura transportados no total	12			
	2,264			
Volume total dos painéis do pavimento (m ³)	7,8			
	6,0			
Nº de painéis do pavimento transportados no total	12			
Volume total dos painéis das paredes interiores (m ³)	1,5			
Nº de painéis das paredes interiores transportados no total	9			
Nº total de painéis transportados	47			
Volume total ocupado (m ³)	58,1			
Percentagem de volume total ocupado para cada tipo de contentor (%)	176%	86%	76%	66%

	Tipologia T ₂			
	6096 mm	12192 mm	High Cube de 12192 mm	High Cube de 13716 mm
Nº de painéis das paredes exteriores transportados no total			18	
Volume total dos painéis das paredes exteriores (m ³)			24,2	
Comprimento útil (m)			6	
Largura útil (m)			12	
Área útil (m ²)			72	
Área bruta (m ²)			82	
Área total dos painéis da cobertura (m ²)			83,2	
			6,1	
Volume total dos painéis da cobertura (m ³)			17,6	
			8,1	
Nº de painéis da cobertura transportados no total			18	
			4,528	
Volume total dos painéis do pavimento (m ³)			13,0	
			6,0	
Nº de painéis do pavimento transportados no total			18	
Volume total dos painéis das paredes interiores (m ³)			2,5	
Nº de painéis das paredes interiores transportados no total			15	
Nº total de painéis transportados			69	
Volume total ocupado (m ³)			82,1	
Percentagem de volume total ocupado para cada tipo de contentor (%)	249%	121%	108%	93%

Tipologia T ₃				
	6096 mm	12192 mm	High Cube de 12192 mm	High Cube de 13716 mm
Nº de painéis das paredes exteriores transportados no total			20	
Volume total dos painéis das paredes exteriores (m ³)			26,9	
Comprimento útil (m)			8	
Largura útil (m)			12	
Área útil (m ²)			96	
Área bruta (m ²)			107	
Área total dos painéis da cobertura (m ²)			108,4	
Volume total dos painéis da cobertura (m ³)			12,2	
			21,1	
			8,1	
Nº de painéis da cobertura transportados no total			24	
Volume total dos painéis do pavimento (m ³)			9,056	
			15,6	
			6,0	
Nº de painéis do pavimento transportados no total			24	
Volume total dos painéis das paredes interiores (m ³)			4,0	
Nº de painéis das paredes interiores transportados no total			24	
Nº total de painéis transportados			92	
Volume total ocupado (m ³)			103,1	
Percentagem de volume total ocupado para cada tipo de contentor (%)	312%	152%	135%	117%

Tipologia T ₄				
	6096 mm	12192 mm	High Cube de 12192 mm	High Cube de 13716 mm
Nº de painéis das paredes exteriores transportados no total			22	
Volume total dos painéis das paredes exteriores (m ³)			29,6	
Comprimento útil (m)			10	
Largura útil (m)			12	
Área útil (m ²)			120	
Área bruta (m ²)			132	
Área total dos painéis da cobertura (m ²)			133,6	
Volume total dos painéis da cobertura (m ³)			18,4	
			24,6	
			8,1	
Nº de painéis da cobertura transportados no total			30	

	13,584			
Volume total dos painéis do pavimento (m³)	18,2			
	6,0			
Nº de painéis do pavimento transportados no total	30			
Volume total dos painéis das paredes interiores (m³)	5,2			
Nº de painéis das paredes interiores transportados no total	31			
Nº total de painéis transportados	113			
Volume total ocupado (m³)	123,7			
Percentagem de volume total ocupado para cada tipo de contentor (%)	375%	183%	162%	140%

Tipologia T ₅				
	6096 mm	12192 mm	High Cube de 12192 mm	High Cube de 13716 mm
Nº de painéis das paredes exteriores transportados no total			22	
Volume total dos painéis das paredes exteriores (m³)			29,6	
Comprimento útil (m)			10	
Largura útil (m)			12	
Área útil (m²)			120	
Área bruta (m²)			132	
Área total dos painéis da cobertura (m²)			133,6	
			18,4	
Volume total dos painéis da cobertura (m³)			24,6	
			8,1	
Nº de painéis da cobertura transportados no total			30	
			13,584	
Volume total dos painéis do pavimento (m³)			18,2	
			6,0	
Nº de painéis do pavimento transportados no total			30	
Volume total dos painéis das paredes interiores (m³)			0,8	
Nº de painéis das paredes interiores transportados no total			5	
Nº total de painéis transportados			87	
Volume total ocupado (m³)			119,3	
Percentagem de volume total ocupado para cada tipo de contentor (%)	362%	176%	156%	135%

	Tipologia T ₆			
	6096 mm	12192 mm	High Cube de 12192 mm	High Cube de 13716 mm
Nº de painéis das paredes exteriores transportados no total			24	
Volume total dos painéis das paredes exteriores (m ³)			32,3	
Comprimento útil (m)			12	
Largura útil (m)			12	
Área útil (m ²)			144	
Área bruta (m ²)			157	
Área total dos painéis da cobertura (m ²)			158,8	
Volume total dos painéis da cobertura (m ³)			24,5	
			28,2	
			8,1	
Nº de painéis da cobertura transportados no total			36	
Volume total dos painéis do pavimento (m ³)			18,112	
			20,8	
			6,0	
Nº de painéis do pavimento transportados no total			36	
Volume total dos painéis das paredes interiores (m ³)			5,9	
Nº de painéis das paredes interiores transportados no total			35	
Nº total de painéis transportados			131	
Volume total ocupado (m ³)			143,8	
Percentagem de volume total ocupado para cada tipo de contentor (%)	436%	212%	189%	163%

b) Paredes exteriores com $U=0,45 \text{ W/m}^2\text{K}$

	Tipologia T ₀			
	6096 mm	12192 mm	High Cube de 12192 mm	High Cube de 13716 mm
Nº de painéis das paredes exteriores transportados no total			12	
Volume total dos painéis das paredes exteriores (m ³)			4,5	
Comprimento útil (m)			6	
Largura útil (m)			6	
Área útil (m ²)			36	
Área bruta (m ²)			38	
Área total dos painéis da cobertura (m ²)			43,6	

Volume total dos painéis da cobertura (m³)	0,4	1,8	2,1	
Nº de painéis da cobertura transportados no total	9			
Volume total dos painéis do pavimento (m³)	0,3228	1,5	1,7	
Nº de painéis do pavimento transportados no total	9			
Volume total dos painéis das paredes interiores (m³)	0,8			
Nº de painéis das paredes interiores transportados no total	5			
Nº total de painéis transportados	35			
Volume total ocupado (m³)	13,1			
Percentagem de volume total ocupado para cada tipo de contentor (%)	40%	19%	17%	15%

Tipologia T ₁				
	6096 mm	12192 mm	High Cube de 12192 mm	High Cube de 13716 mm
Nº de painéis das paredes exteriores transportados no total			14	
Volume total dos painéis das paredes exteriores (m³)			5,2	
Comprimento útil (m)			8	
Largura útil (m)			8	
Área útil (m²)			64	
Área bruta (m²)			66	
Área total dos painéis da cobertura (m²)			56,8	
Volume total dos painéis da cobertura (m³)			0,8	
			2,7	
			2,1	
Nº de painéis da cobertura transportados no total			12	
Volume total dos painéis do pavimento (m³)			0,6456	
			2,2	
			1,7	
Nº de painéis do pavimento transportados no total			12	
Volume total dos painéis das paredes interiores (m³)			1,5	
Nº de painéis das paredes interiores transportados no total			9	
Nº total de painéis transportados			47	
Volume total ocupado (m³)			16,8	
Percentagem de volume total ocupado para cada tipo de contentor (%)	51%	25%	22%	19%

Tipologia T ₂				
	6096 mm	12192 mm	High Cube de 12192 mm	High Cube de 13716 mm
Nº de painéis das paredes exteriores transportados no total			18	
Volume total dos painéis das paredes exteriores (m ³)			6,7	
Comprimento útil (m)			6	
Largura útil (m)			12	
Área útil (m ²)			72	
Área bruta (m ²)			75	
Área total dos painéis da cobertura (m ²)			83,2	
Volume total dos painéis da cobertura (m ³)			1,6	
			4,5	
			2,1	
Nº de painéis da cobertura transportados no total			18	
Volume total dos painéis do pavimento (m ³)			1,2912	
			3,7	
			1,7	
Nº de painéis do pavimento transportados no total			18	
Volume total dos painéis das paredes interiores (m ³)			2,5	
Nº de painéis das paredes interiores transportados no total			15	
Nº total de painéis transportados			69	
Volume total ocupado (m ³)			24,0	
Percentagem de volume total ocupado para cada tipo de contentor (%)	73%	36%	32%	27%

Tipologia T ₃				
	6096 mm	12192 mm	High Cube de 12192 mm	High Cube de 13716 mm
Nº de painéis das paredes exteriores transportados no total			20	
Volume total dos painéis das paredes exteriores (m ³)			7,5	
Comprimento útil (m)			8	
Largura útil (m)			12	
Área útil (m ²)			96	
Área bruta (m ²)			99	
Área total dos painéis da cobertura (m ²)			108,4	
Volume total dos painéis da cobertura (m ³)			3,1	
			5,4	
			2,1	
Nº de painéis da cobertura transportados no total			24	

Volume total dos painéis do pavimento (m³)	2,5824			
	4,5			
	1,7			
Nº de painéis do pavimento transportados no total	24			
Volume total dos painéis das paredes interiores (m³)	4,0			
Nº de painéis das paredes interiores transportados no total	24			
Nº total de painéis transportados	92			
Volume total ocupado (m³)	30,8			
Percentagem de volume total ocupado para cada tipo de contentor (%)	93%	45%	40%	35%

Tipologia T ₄				
	6096 mm	12192 mm	High Cube de 12192 mm	High Cube de 13716 mm
Nº de painéis das paredes exteriores transportados no total	22			
Volume total dos painéis das paredes exteriores (m³)	8,2			
Comprimento útil (m)	10			
Largura útil (m)	12			
Área útil (m²)	120			
Área bruta (m²)	123			
Área total dos painéis da cobertura (m²)	133,6			
	4,7			
Volume total dos painéis da cobertura (m³)	6,3			
	2,1			
Nº de painéis da cobertura transportados no total	30			
	3,8736			
Volume total dos painéis do pavimento (m³)	5,2			
	1,7			
Nº de painéis do pavimento transportados no total	30			
Volume total dos painéis das paredes interiores (m³)	5,2			
Nº de painéis das paredes interiores transportados no total	31			
Nº total de painéis transportados	113			
Volume total ocupado (m³)	37,2			
Percentagem de volume total ocupado para cada tipo de contentor (%)	113%	55%	49%	42%

Tipologia T ₅				
	6096 mm	12192 mm	High Cube de 12192 mm	High Cube de 13716 mm
Nº de painéis das paredes exteriores transportados no total			22	
Volume total dos painéis das paredes exteriores (m ³)			8,2	
Comprimento útil (m)			10	
Largura útil (m)			12	
Área útil (m ²)			120	
Área bruta (m ²)			123	
Área total dos painéis da cobertura (m ²)			133,6	
Volume total dos painéis da cobertura (m ³)			4,7	
			6,3	
			2,1	
Nº de painéis da cobertura transportados no total			30	
Volume total dos painéis do pavimento (m ³)			3,8736	
			5,2	
			1,7	
Nº de painéis do pavimento transportados no total			30	
Volume total dos painéis das paredes interiores (m ³)			0,8	
Nº de painéis das paredes interiores transportados no total			5	
Nº total de painéis transportados			87	
Volume total ocupado (m ³)			32,8	
Percentagem de volume total ocupado para cada tipo de contentor (%)	99%	48%	43%	37%

Tipologia T ₆				
	6096 mm	12192 mm	High Cube de 12192 mm	High Cube de 13716 mm
Nº de painéis das paredes exteriores transportados no total			24	
Volume total dos painéis das paredes exteriores (m ³)			9,0	
Comprimento útil (m)			12	
Largura útil (m)			12	
Área útil (m ²)			144	
Área bruta (m ²)			148	
Área total dos painéis da cobertura (m ²)			158,8	
Volume total dos painéis da cobertura (m ³)			6,2	
			7,1	
			2,1	
Nº de painéis da cobertura transportados no total			36	

			5,1648	
Volume total dos painéis do pavimento (m³)			5,9	
			1,7	
Nº de painéis do pavimento transportados no total			36	
Volume total dos painéis das paredes interiores (m³)			5,9	
Nº de painéis das paredes interiores transportados no total			35	
Nº total de painéis transportados			131	
Volume total ocupado (m³)			43,1	
Percentagem de volume total ocupado para cada tipo de contentor (%)	131%	64%	56%	49%